

ISSN 2521-6406 (print)  
ISSN 2617-6092 (online)  
DOI: 10.32434/2521-6406

# КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ: АНАЛІЗ, УПРАВЛІННЯ, ОПТИМІЗАЦІЯ

COMPUTER MODELING:  
ANALYSIS, CONTROL, OPTIMIZATION

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC JOURNAL

№1 (5)  
2019

<http://kmauo.org>

## Р е д а к ц і й н а к о л е г і я

Головний редактор *д.т.н., проф. ЗЕЛЕНЦОВ Дмитро Гегемонович*  
Замісник головного редактора *д.ф.-м.н., проф. КОСОЛАП Анатолій Іванович*  
Відповідальний секретар *к.т.н., доц. ЛЯШЕНКО Оксана Анатоліївна*

БОМБА Андрій Ярославович д.т.н., проф., ГНАТУШЕНКО Володимир Володимирович д.т.н., проф., ГОЛОДНОВ Олександр Іванович д.т.н., проф., КАІРОВ Олексій Сергійович д.т.н., проф., КОРОТКА Лариса Іванівна к.т.н., доц., ЛЯШЕНКО Віктор Павлович д.т.н., проф., МАТВІЙЧУК Андрій Вікторович д.е.н., проф., МУХІН Вадим Євгенович д.т.н., проф., НАУМЕНКО Наталія Юріївна к.т.н., доц., ОЛЕВСЬКИЙ Віктор Ісаакович д.т.н., проф., СОЛОДКА Наталія Олександрівна к.т.н., доц., ТАРАНЕНКО Юрій Карлович д.т.н., проф., ФЕДОРОВ Євген Євгенович д.т.н., проф., ФЕДОРОВИЧ Олег Євгенович д.т.н., проф., ХАРЧЕНКО Олександр Васильович д.х.н., проф.

## М і ж н а р о д н а р е д а к ц і й н а к о л е г і я

V. VISHNU Vardhan (*India*), MAMEDOV Arif (*The Republic of Azerbaijan*),  
MILENIN Andrij (*Poland*), MUSAYEV Vidadi (*The Republic of Azerbaijan*),  
STAROVOITOV Eduard (*Republic of Belarus*), ZILINSKAS Julius (*Lithuania*),  
SHARY Sergey (*Russian Federation*)

Комп'ютерна верстка

Л.П. БУРМІСТР

Технічний редактор

Л.М. ТОНКОШКУР

### Адреса редакції видавника журналу:

Україна, 49005, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 8  
ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»  
тел. (0562) 47-35-27, E-mail: smaco@udhtu.edu.ua

*Перереєстровано 26.04.2019 Міністерством юстиції України серія КВ № 23960-13800ПР*

Рекомендовано до друку вченою радою ДВНЗ УДХТУ  
(протокол № 5 від 16.05.2019)

Оригінал-макет виготовлено редакцією журналу ДВНЗ УДХТУ.  
Підписано до друку з готових форм 14.06.2019. Формат 60×84 1/8. Папір ксероксний.  
Гарнітура Академічна. Друк різнограф. Умовн. друк. арк. 9,91. Обл. вид. арк. 9,96.  
Тираж 300 прим. Замовлення № 232

Тираж віддруковано РВВ ДВНЗ УДХТУ,  
м. Дніпро, пр. Гагаріна, 8, тел. (0562) 47-26-68  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5026 від 16.12.2015 р.

Дніпро 2019

Міністерство освіти і науки України

Державний вищий навчальний заклад  
«Український державний хіміко-технологічний університет»

## Комп'ютерне моделювання: аналіз, управління, оптимізація

1 (5), 2019

Науковий журнал

виходить  
2 рази на рік

### ЗМІСТ

<i>Беляновська О.А., Литовченко Р.Д., Михайлов А.Г., Сухий К.М., Суха І.В.</i> Алгоритм розрахунку конструктивних та експлуатаційних характеристик адсорбційного акумулятора теплової енергії відкритого типу на основі композитних адсорбентів .....	3
<i>Єгоров Є.А., Кучеренко О.Є.</i> Пошук ефективної топології структурних конструкцій на основі напіввизначеної оптимізації .....	9
<i>Зеленцов Д.Г., Денисюк О.Р.</i> Метод розв'язання задач оптимізації згинних стрижнів з урахуванням корозійного зносу .....	15
<i>Коряшкіна Л.С., Беляєв О.Р.</i> Визначення оптимальної кількості та місць розміщення зарядних станцій для електромобілів на території міста .....	23
<i>Манко Г.І., Чистоклетов Є.П.</i> Використання інформаційної невизначеності в задачах ідентифікації .....	30
<i>Никоненко О.М., Коротка Л.І.</i> Розпізнавання та генерація QR/bar-кодів у мобільних додатках .....	36
<i>Олевський В.І., Олевський О.В.</i> Деякі особливості комп'ютерного моделювання згину пружної кругової арки з вирізом .....	43
<i>Олійник О.Ю., Тараненко Ю.К.</i> Розробка аналітичної моделі для розрахунку і оптимізації віброакустичного навантаження трубопроводів технологічних апаратів .....	54
<i>Писарькова В.Р., Науменко Н.Ю.</i> Підходи кластерного аналізу до оцінки фінансово-економічної діяльності підприємств .....	63
<i>Тітова О.В., Кравець В.І., Мінакова Н.О., Чернецький Є.В., Гнатко О.М.</i> Математичне моделювання процесу подрібнення з одночасним сушінням матеріалу в відцентровому млині .....	70
Відомості про авторів .....	75
Іменний покажчик .....	77

Ministry of Education and Science of Ukraine

*Ukrainian State University of Chemical Technology*

# Computer Modeling: Analysis, Control, Optimization

1 (5), 2019

Scientific journal

2 issues per year

---

## CONTENT

<i>Belyanovskaya E.A., Lytovchenko R.D., Mikhailov A.G., Sukhyy K.M., Sukha I.V.</i> Algorithm for calculation of design and performance of open-type heat storage device based on composite adsorbents .....	3
<i>Egorov E.A., Kucherenko A.E.</i> Finding of effective topology of space structures using semidefinite programming .....	9
<i>Zelentsov D.G., Denysiuk O.R.</i> A method for solving problems of bending rod optimization taking corrosion into account .....	15
<i>Koriashkina L.S., Belyaev A.R.</i> Determination of optimal number and places of location of charging station for electric vehicles inside the city .....	23
<i>Manko G.I., Chistokletov E.P.</i> Use of information uncertainty in identification tasks .....	30
<i>Nikonenko A.N., Korotka L.I.</i> Recognition and generation of QR/bar codes in mobile applications .....	36
<i>Olevskiy V.I., Olevskiy O.V.</i> Some peculiarities of computer modeling of a bending of elastic circular arch with notch .....	43
<i>Oliylyk O., Taranenko Y.</i> Development of an analytical model for calculating and optimizing vibroacoustic loading of technological equipment pipelines .....	54
<i>Pisarkova V.R., Naumenko N.Yu.</i> Cluster analysis approaches to assessing the financial and economic activities of enterprises .....	63
<i>Titova O.V., Kravets V.I., Minakova N.O., Chernetsky E.V., Gnatko O.M.</i> Mathematical modeling of the grinding process with simultaneous drying of the material in a centrifugal mill .....	70
Information about the authors .....	75
Name index .....	77

УДК 662.995

*Беляновська О.А., Литовченко Р.Д., Михайлов А.Г., Сухий К.М., Суха І.В.***АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ КОНСТРУКТИВНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АДСОРБЦІЙНОГО АКУМУЛЯТОРА ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ВІДКРИТОГО ТИПУ НА ОСНОВІ КОМПОЗИТНИХ АДСОРБЕНТІВ****ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, Україна**

Робота присвячена розробці ефективного алгоритму визначення експлуатаційних і конструктивних характеристик адсорбційного акумулятора теплової енергії відкритого типу. Отримав подальший розвиток алгоритм розрахунку експлуатаційних характеристик адсорбційного теплового акумулятора відкритого типу. Пропонується наступний порядок розрахунку: обчислення коефіцієнта масопередачі, визначення маси води, яку подано з пароповітряним потоком до шару теплоакumuлюючого матеріалу (адсорбенту), розрахунок величини адсорбції, корисної теплоти адсорбції, визначення витрат теплоти на процес, які включають витрати теплоти для нагріву адсорбенту, корпусу установки, води в зволожувачі, випаровування води, нагрівання адсорбованої води і десорбцію, а також обчислення коефіцієнта корисної дії. Маса води, яку подано до шару адсорбента визначали двома способами: відповідно до граничної адсорбції або враховуючи об'єм та абсолютну вологість пароповітряного потоку, який поступає до шару адсорбенту. Вивчено експлуатаційні характеристики теплового акумулятора відкритого типу при використанні композитного адсорбенту «силікагель–натрій сульфат». Підтверджено підвищення коефіцієнта корисної дії при зростанні швидкості та відносної вологості пароповітряного потоку. Показано кореляцію конструктивних характеристик та ефективності адсорбційного теплоакumuлюючого пристрою. Базуючись на запропонованому алгоритмі, показано, що максимальні значення коефіцієнта корисної дії відповідають площі перерізу теплоакumuлюючого матеріалу 0,08–0,11 м<sup>2</sup> за умови відносної вологості пароповітряного потоку не нижче 40–50% та швидкостях 0,5–0,8 м/с. Результати здійсненого дослідження можуть бути використані при розробці енергоефективних децентралізованих систем повітряного опалення, а також адсорбційних модулів-осушувачів для житлових приміщень.

**Ключові слова:** адсорбційний акумулятор теплової енергії, коефіцієнт корисної дії, теплота адсорбції, композитний адсорбент.

**DOI:** 10.32434/2521-6406-2019-5-1-3-8

***Постановка проблеми***

Теплоакumuлюючі пристрої використовують в різних галузях промисловості: для захисту електронних приладів від перегріву, для стабілізації температур в приміщенні та обладнання. Ключевим є використання акумуляторів теплової енергії в геліосистемах теплопостачання, яке дозволяє скорегувати добову та сезонну нерівномірність потоку сонячного випромінювання, а також незбалансованість періодів виробництва та споживання теплової енергії.

***Аналіз останніх досліджень та публікацій***

Застосування адсорбційних теплових акумуляторів в системах опалювання, а також підігріву та кондиціонування припливного повітря пропонувалось протягом останніх десяти років [1–3]. Перспективними для подібних пристроїв для поглинання, трансформації та акумуляування теплової енергії є композитні адсорбенти типу «сіль в поринній матриці» [4,5]. Так, композит SWS-1A (оксид алюмінію, який імпрегровано кальцій хлоридом) виявив кращі адсорбційні властивості в порівнянні з традицій-

ними діоксидом кремнію та оксидом алюмінію [5]. В той же час, математичні моделі розглядають переважно одну зі стадій процесів експлуатації адсорбційних теплоакумуючих пристроїв, зокрема, процеси масоперенесення при адсорбції [6,7]. Алгоритми та методи розрахунку, які дозволяють оцінити кореляцію конструкції та ефективність експлуатації акумуляторів теплової енергії розроблені переважно для ємнісних пристроїв [8]. Отже стає актуальною задача розробки загальних принципів визначення конструктивних характеристик, які відповідають максимальній ефективності адсорбційних теплоакумуючих пристроїв.

#### Формування мети дослідження

Надана робота присвячена розробці алгоритму визначення конструктивних характеристик адсорбційного теплового акумулятора, які відповідають його максимальній ефективності.

Конструкція теплоакумуючого пристрою відкритого типу наведена на рис. 1 згідно з [2].

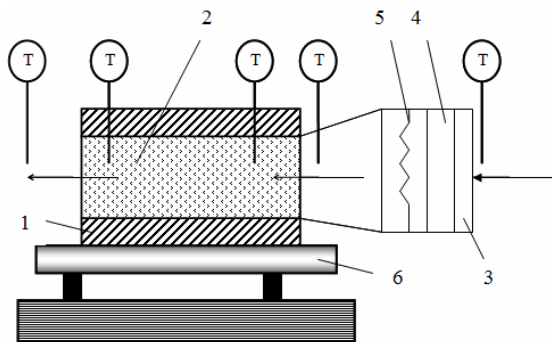


Рис. 1. Експериментальна установка для дослідження теплоакумуючих матеріалів: 1 – теплоізолюючий корпус; 2 – теплоакумуючий матеріал; 3 – компресор; 4 – зволожувач; 5 – резистивний нагрівальний елемент; 6 – терези

Експлуатацію здійснюють в два етапи. На першому етапі повітря з навколишнього середовища за допомогою компресора 3 подають в зволожувач 4, де його відносна вологість зростає до 60–80 %. Далі зволене повітря нагрівають в електричному резистивному нагрівальному елементі 5, до температур більш за 30°. Потім зволене повітря подають до шару адсорбенту. Після нетривалого прогрівання теплоакумуючого матеріалу (15 хв) вода адсорбується з повітря, що подається в теплоакумуючий матеріал, що є екзотермічним процесом. Температури як теплоакумуючого матеріалу, так і повітря зростають. При цьому температура повітря на виході з теплоакумуючого пристрою скла-

дає 90–115°C. На другому етапі здійснюється регенерація адсорбента шляхом подачі гарячого повітря, що приводить до нагрівання адсорбенту до температур не нижче 90°C, і, отже, до десорбції.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) розраховували за запропонованим алгоритмом [2], як, %:

$$\text{ККД} = \frac{Q_{\text{кор}}}{Q_3} \cdot 100, \quad (1)$$

де  $Q_{\text{кор}}$  – корисна теплота (теплота адсорбції), кДж;

$$Q_{\text{кор}} = M_{\text{адс}} \cdot \Delta H_{\text{адс}}, \quad (2)$$

де  $M_{\text{адс}}$  – маса адсорбенту, кг;  $\Delta H_{\text{адс}}$  – теплота адсорбції, кДж/кг;  $Q_3$  – витрати теплоти, кДж:

$$Q_3 = Q_{\text{адс}} + Q_{\text{корп}} + Q_{\text{нагр}} + Q_{\text{вип}}^{\text{води}} + Q_{\text{дес}} + Q_{\text{адс}}^{\text{води}}, \quad (3)$$

де  $Q_{\text{адс}}$ ,  $Q_{\text{корп}}$ ,  $Q_{\text{нагр}}$ ,  $Q_{\text{вип}}^{\text{води}}$ ,  $Q_{\text{дес}}$ ,  $Q_{\text{адс}}^{\text{води}}$  – відповідно, на кожній стадії, витрати теплоти для нагріву адсорбенту, корпуса установки, нагрівання води в баку, випаровування води в баку, десорбцію, нагрівання адсорбованої води, кДж.

Кількість теплоти, необхідне для нагрівання матеріалу і деталей пристрою розраховували за загальновідомою формулою

$$Q = M \cdot C \cdot \Delta t, \quad (4)$$

де  $M$  – маса матеріалу або деталі, кг;  $C$  – теплоємність матеріалу або деталі, кДж/кг·К;  $\Delta t$  – зміна температури, °С.

Витрати на випаровування води визначали, як добуток маси води, яку подано до шару теплоакумуючого матеріалу (адсорбенту)  $M_{\text{H}_2\text{O}}$  та теплоти випаровування  $\Delta H_{\text{вип}}$ :

$$Q_{\text{вип}}^{\text{води}} = M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \Delta H_{\text{вип}}. \quad (5)$$

Вплив швидкості руху пароповітряної суміші на коефіцієнт корисної дії врахований введенням в розрахунок коефіцієнта  $A$ , який показує величину адсорбції, кг/кг. Цей коефіцієнт використовували при розрахунку витрат теплоти на десорбції:

$$Q_{\text{дес}} = \Delta H_{\text{дес}} \cdot M_{\text{адс}} \cdot A \quad (6)$$

і на нагрівання адсорбованої води:

$$Q_{\text{сор}}^{\text{води}} = M_{\text{адс}} \cdot A \cdot C_{\text{в}} \cdot (t_{\text{рег}} - t_{\text{н.с}}), \quad (7)$$

де  $t_{\text{рег}}$  – температура регенерації адсорбенту, °C;  $t_{\text{н.с.}}$  – температура навколишнього середовища, °C;  $\Delta H_{\text{дес}}=2850$  – теплота десорбції, кДж/кг.

Величину адсорбції визначали, як:

$$A = \frac{C_0 - C}{M_{\text{адс}}} \cdot V_{\text{пов}}, \quad (8)$$

де  $V_{\text{пов}}$  – об'єм повітря:  $V_{\text{пов}}=F_{\text{адс}} \cdot w \cdot t$ , м<sup>3</sup>;  $w$  – швидкість пароповітряного потоку, м/с;  $F_{\text{адс}}$  – площа перерізу теплового акумулятора, м<sup>2</sup>;  $C$  – абсолютна вологість пароповітряного потоку на виході з теплового акумулятора [2]:

$$C = \frac{C_0}{\frac{[\beta \cdot (-\tau \cdot w \cdot C_0) + H]}{e^{\frac{A_{\text{max}}}{w}} + 1}}, \quad (9)$$

де  $t$  – тривалість адсорбції, с;  $C_0$  – абсолютна вологість пароповітряного потоку на вході в тепловий акумулятор, кг/м<sup>3</sup>;  $H$  – шару адсорбента, м;  $A_{\text{max}}$  – адсорбційна ємність теплоакуючого матеріалу, кг/кг;  $\beta$  – коефіцієнт масопередачі, с<sup>-1</sup>, який визначено згідно з залежністю [2]:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta_y} + \frac{1}{\beta_n} + \frac{1}{\beta_{\text{пр}}},$$

де  $\beta_y$ ,  $\beta_n$  та  $\beta_{\text{пр}}$  – коефіцієнти масовіддачі в газовій фазі, в порах і повздовжнього перемішування [2].

Для розробки методів підвищення коефіцієнта корисної дії виконано аналіз структури теплових витрат при експлуатації теплоакуючого пристрою відкритого типу [2]. Згідно з його результатами встановлено, що найбільш значними є витрати на випаровування води (43%) та десорбцію (47%), далі йдуть витрати на нагрів адсорбованої води (6%), нагрівання води (3%) та нагрівання корпусу теплового акумулятора (1%). Вочевидь, істотно скоротити витрати теплоти можна шляхом зміни маси води, яку подано до шару адсорбенту.

Масу води, яка подана до шару адсорбенту, може бути прийнято відповідно до граничної адсорбції

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = A_{\text{max}} \cdot M_{\text{адс}} \quad (10)$$

або, враховуючи швидкість потоку вологого повітря, як добуток об'єму повітря, що пройшов через теплокумулюючий матеріал,  $V_{\text{пов}}$  та абсолютної вологості пароповітряного потоку на вході до шару адсорбента  $C_0$ :

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{пов}} \cdot C_0. \quad (11)$$

Блок-схема доповненого алгоритму, яка розроблена відповідно до даної методики розрахунку, надана на рис. 2.

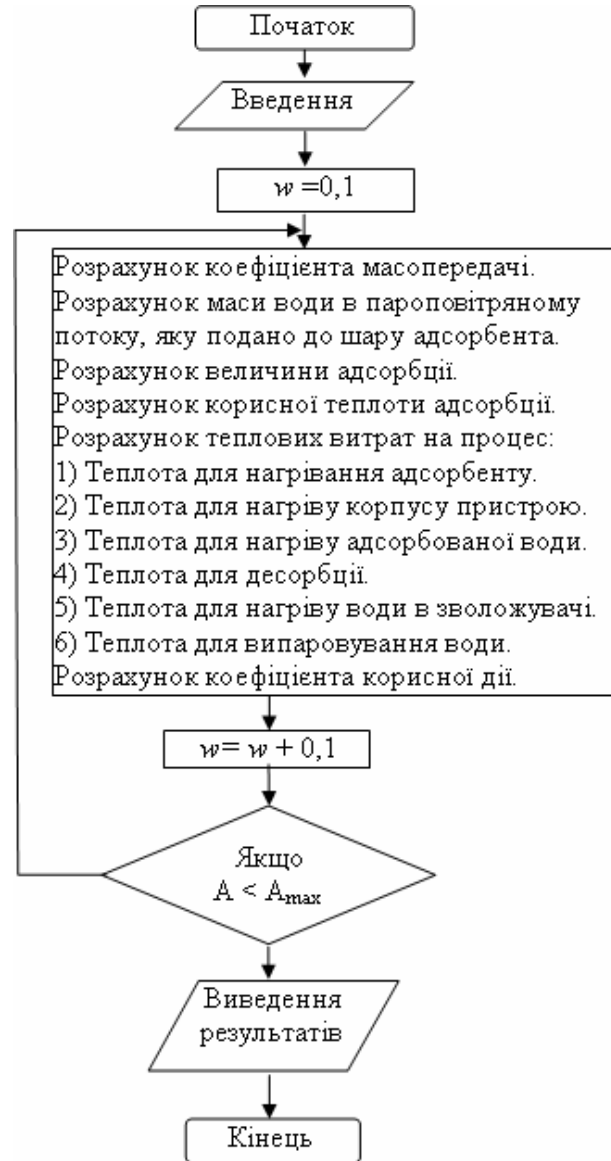


Рис. 2. Блок-схема алгоритму розрахунку коефіцієнта корисної дії адсорбційного теплового акумулятора відкритого типу

### Викладення основного матеріалу дослідження

Рис. 3 показує залежність коефіцієнта корисної дії від швидкості пароповітряного потоку, що подається на теплоакумулюючий пристрій. Лінія 1 показує, що, якщо маса води прийнята відповідною граничній адсорбції, то максимальне значення коефіцієнта корисної дії (ККД) спостерігається в доволі вузькому діапазоні швидкостей.

В той же час, якщо при подачі води відповідно до об'єму та абсолютній вологості повітря згідно з формулою (11), то на графіку залежності ККД від швидкості повітря, він виходить на плато при  $w=0,1$  м/с (рис. 3, криві 2). В той же час при аналогічних умовах (рис. 4), оскільки маса води, яка подано до шару теплоакумулюючого матеріалу, не лише залежить від швидкості потоку, але й перевищує величину, що відповідає адсорбції водяної пари шаром композиту за даних умов, близько в три рази. Коефіцієнт корисної дії при цьому не перевищує 40%.

Скорегувати величину маси води, яку подано до шару адсорбента, враховуючи вплив абсолютної вологості повітря на адсорбцію, можливо, вочевидь, змінюючи об'єм повітря, шляхом зміни площі перерізу теплового акумулятора, і, отже, товщини шару адсорбенту. Так, зниження площі перерізу від 0,1662 до 0,0831 м<sup>2</sup> сприяє підвищенню коефіцієнта корисної дії від 42 до 50% (рис. 5). При цьому максимальні значення коефіцієнта корисної дії спостерігаються в більш широкому інтервалі швидкостей пароповітряного потоку в порівнянні з подачею вологи відповідно до граничної адсорбції.

В той же час максимальні значення адсорбції спостерігаються вочевидь при значеннях  $w=0,5-0,8$  м/с [2] температурах 40–60°C та відносних вологостях пароповітряного потоку не нижче за 40–50%. Отже, враховуючи забезпечення максимального теплового навантаження, доцільно експлуатувати тепловий акумулятор відповідно до зазначених експлуатаційних характеристик.

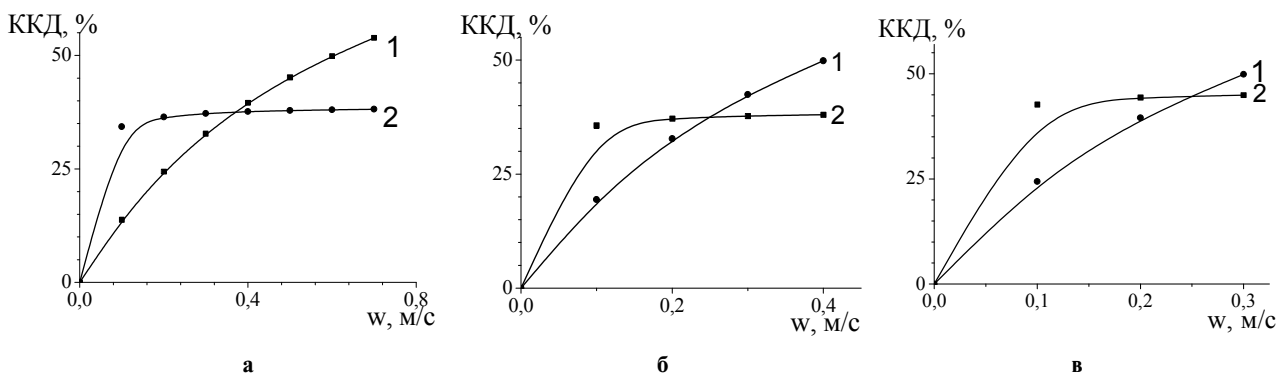


Рис. 3. Вплив швидкості пароповітряного потоку (абсолютна вологість: а – 0,04; б – 0,06; в – 0,08 г/м<sup>3</sup>) на коефіцієнт корисної дії адсорбційного теплового акумулятора відкритого типу: 1 – маса води відповідає граничній адсорбції; 2 – маса води, яка подана з вологим повітрям до шару адсорбенту

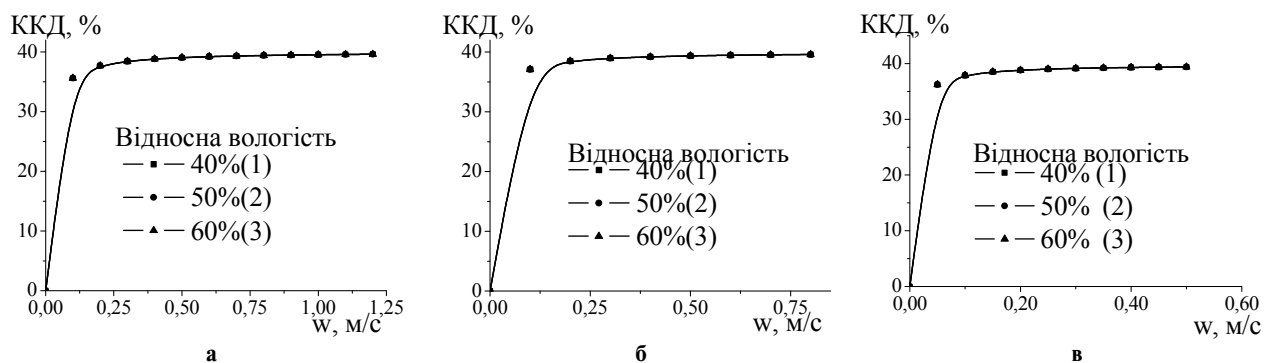


Рис. 4. Вплив швидкості пароповітряного потоку та відносної вологості на коефіцієнт корисної дії адсорбційного теплового акумулятора відкритого типу. Температура пароповітряного потоку, °C: а – 40; б – 50; в – 60. Товщина шару адсорбенту 0,25 м



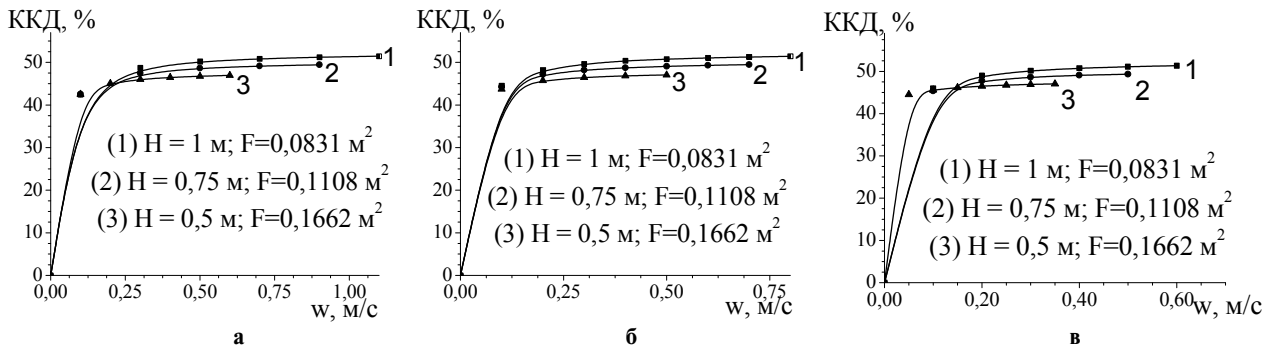


Рис. 5. Вплив конструктивних характеристик на величину коефіцієнта корисної дії теплоакumuлюючого пристрою відкритого типу. Температура пароповітряного потоку 50°C. Відносна вологість пароповітряного потоку: а – 30%; б – 40%; в – 50%

### Висновки

Досліджено процеси експлуатації адсорбційного акумулятора теплової енергії відкритого типу на основі композитного адсорбента «сілікагель – натрій сульфат». Отримав подальший розвиток алгоритм визначення експлуатаційних характеристик адсорбційного теплового акумулятора.

Показано вплив швидкості, температури та вологості пароповітряного потоку на коефіцієнт корисної дії теплового акумулятора. Встановлено кореляцію між конструктивними характеристиками коефіцієнтом корисної дії адсорбційного теплоакumuлюючого пристрою. Максимальні значення коефіцієнта корисної дії відповідають площі перерізу теплоакumuлюючого матеріалу 0,08–0,11 м<sup>2</sup> за умови відносної вологості пароповітряного потоку не нижче 40–50% та швидкостях 0,5–0,8 м/с.

Надана робота виконана за часткової підтримки Міністерства освіти і науки України (номер держреєстрації теми НДР 0119U002243).

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Gordeeva L.G., Aristov Yu.I. Adsorptive heat storage and amplification: new cycles and adsorbents // *Energy*. – 2019. – Vol.167. – P.440-453.
2. Sukhyu K.M., Belyanovskaya E.A., Kolomiyets E.V. Design and performance of adsorptive transformers of heat energy. – Riga, Latvia: LAP Lambert Academic Publishing, 2018. – 117 p.
3. Scapino L., Zondag H.A., Van Bael J., Diriken J., Rindt C.C.M. Sorption heat storage for long-term low-temperature applications: A review on the advancements at material and prototype scale // *Applied Energy*. – 2017. – Vol.190. – P.920-948.
4. Grekova A.D., Gordeeva L.G., Aristov Y.I. Composite “LiCl/vermiculite” as advanced water sorbent for thermal energy storage // *Applied Thermal Engineering*. – 2017. – Vol.124. – P.1401-1408.

5. Aristov Yu I. Current progress in adsorption technologies for low-energy buildings // *Future Cities and Environment*. – 2015. – Vol.1. – № 10. – P.1-13.

6. Nagel T., Beckert S., Lehmann Ch., Glöser R., Kolditz O. Multi-physical continuum models of thermochemical heat storage and transformation in porous media and powder beds – A review // *Applied Energy*. – 2016. – Vol.178. – P.323-345.

7. Schreiber H., Lanzerath F., Bardow A. Predicting performance of adsorption thermal energy storage: from experiments to validated dynamic models // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – Vol.141. – P.548-557.

8. Ганжа И.Г., Хищенко А.Г. Тепловое аккумулярование как способ повышения энергетической эффективности систем теплоснабжения // *Энергосбережение. – Энергетика. – Энергоаудит*. – 2012. – № 3 (97). – С.16-21.

Надійшла до редакції 31.03.2019

### АЛГОРИТМ РАСЧЕТА КОНСТРУКТИВНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АДСОРБЦИОННОГО АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ОТКРЫТОГО ТИПА НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТНЫХ АДСОРБЕНТОВ

Беляновская Е.А., Литовченко Р.Д., Михайлов А.Г., Сухой К.М., Сухая И.В.

Работа посвящена разработке эффективного алгоритма определения эксплуатационных и конструктивных характеристик адсорбционного аккумулятора тепловой энергии открытого типа. Получил дальнейшее развитие алгоритм расчета эксплуатационных характеристик адсорбционного теплового аккумулятора открытого типа. Предлагается следующий порядок расчета: вычисление коэффициента массопередачи, определение массы воды, представленной с паровоздушным потоком к слою теплоаккумулярующего материала (адсорбента), расчет величины адсорбции, полезной теплоты адсорбции, определения расхода теплоты на эксплуатацию, включающие расходы теплоты для нагрева адсорбента, корпуса установки, воды в увлажнителе, испарения воды, нагрев адсорбированной воды и десорбцию, а также вычисления коэффициента полезного действия. Массу воды, поданной в слой адсорбента, определяли двумя способами: в соответствии с предельной адсорбции или учитывая объем и абсолютную влажность паровоздушного потока, который поступает в слой адсорбента. Изучены эксплуатационные характеристики теплового аккумулятора открытого типа при использовании ком-

позитного адсорбента «силикагель–натрий сульфат». Подтверждено повышение коэффициента полезного действия при росте скорости и относительной влажности паровоздушной потока. Показана корреляция конструктивных характеристик и эффективности адсорбционного теплоаккумулирующего устройства. Основываясь на предложенном алгоритме, показано, что максимальные значения коэффициента полезного действия соответствуют площади сечения теплоаккумулирующего материала  $0,08-0,11 \text{ м}^2$  при относительной влажности паровоздушной потока не ниже 40–50% и скоростях  $0,5-0,8 \text{ м/с}$ . Результаты проведенного исследования могут быть использованы при разработке энергоэффективных децентрализованных систем воздушного отопления, а также адсорбционных модулей-осушителей для жилых помещений.

**Ключевые слова:** адсорбционный аккумулятор тепловой энергии, коэффициент полезного действия, теплота адсорбции, композитный адсорбент.

#### ALGORITHM FOR CALCULATION OF DESIGN AND PERFORMANCE OF OPEN-TYPE HEAT STORAGE DEVICE BASED ON COMPOSITE ADSORBENTS

*Belyanovskaya E.A., Lytovchenko R.D., Mikhailov A.G., Sukhyy K.M., Sukha I.V.*

Ukrainian State University of Chemical Engineering, Dnipro, Ukraine

The present work is focused on the development of an effective algorithm to determine the operational and design characteristics of an open-type thermal energy storage device. The algorithm for calculating the performance characteristics of an open type adsorption heat accumulator has been further developed. The following calculation procedure is proposed: calculating the mass transfer coefficient, determining mass of water supplied with vapor-air flow to the heat storage material layer (adsorbent), calculation of adsorption, effective heat of adsorption, determination of an operational heat input, including a heat input for warming of an adsorbent, a case, water in a humidifier, evaporation of water, heating the adsorbed water and desorption, as well as calculating the efficiency factor. The mass of water supplied to the adsorbent layer was determined in two ways: in accordance with the limiting adsorption or taking into account the volume and absolute humidity of the vapor-air flow that enters the adsorbent layer. The performance of an open-type thermal accumulator was studied using the composite adsorbent "silica gel-sodium sulphate". An increase in the efficiency with increasing speed and relative humidity of a vapor-air flow was confirmed. The correlation between design characteristics and an efficiency factor of an adsorptive heat storage device is shown. Based on the proposed algorithm, it is shown that the maximum values of efficiency correspond to the cross-sectional area of heat-accumulating material  $0,08-0,11 \text{ м}^2$  at a relative humidity of the vapor-air flow of not less than 40–50% and speeds of  $0,5-0,8 \text{ м/с}$ . The results of the study can be used in the development of energy-efficient decentralized air heating systems, as well as adsorption dryers for residential premises.

**Keywords:** adsorption accumulator of thermal energy, efficiency, heat of adsorption, composite adsorbent.

#### REFERENCES

1. Gordeeva L.G., Aristov Yu.I. *Adsorptive heat storage and amplification: new cycles and adsorbents*. Energy, 2019, vol. 167, pp.440-453.
2. Sukhyy K.M., Belyanovskaya E.A., Kolomiyets E.V. *Design and performance of adsorptive transformers of heat energy*. Riga, Latvia: LAP Lambert Academic Publishing, 2018, 117 p.
3. Scapino L., Zondag H. A., Van Bael J., Diriken J., Rindt C.C.M. *Sorption heat storage for long-term low-temperature applications: A review on the advancements at material and prototype scale*. Applied Energy, 2017, vol. 190, pp.920-948.
4. Grekova A.D., Gordeeva L.G., Aristov Y.I. *Composite "LiCl/vermiculite" as advanced water sorbent for thermal energy storage*. Applied Thermal Engineering, 2017, vol. 124, pp.1401-1408.
5. Aristov Yu I. *Current progress in adsorption technologies for low-energy buildings*. Future Cities and Environment, 2015, vol. 1, no 10, pp.1-13.
6. Nagel T., Beckert S., Lehmann Ch., Gläser R., Kolditz O. *Multi-physical continuum models of thermochemical heat storage and transformation in porous media and powder beds—A review*. Applied Energy, 2016, vol. 178, pp.323-345.
7. Schreiber H., Lanzerath F., Bardow A. *Predicting performance of adsorption thermal energy storage: from experiments to validated dynamic models* // Applied Thermal Engineering, 2018, vol. 141, pp.548-557.
8. Ganga I.G., Khiminko A.G. *Teplovoe akumulirovanie kak sposob povysheniya energeticheskoy effektivnosti sistem teplosnabgeniya* [Heat storage as a method of enhancing of energy efficiency of heat supply system]. Energoberegenie, Energetika, Energoaudit, 2012, no 03(97), pp.16-21 (in Russian).

УДК 624.04:004.942:519.853

*Егоров Е.А., Кучеренко А.Е.*

## ПОИСК ЭФФЕКТИВНОЙ ТОПОЛОГИИ СТРУКТУРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛУОПРЕДЕЛЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», г. Днепр, Украина

В статье рассматривается задача поиска оптимальной топологии пространственных ферменных структур. В математическом контексте предложенный подход объединяет задачу выпуклой оптимизации с дополнительными невыпуклыми условиями и сводит ее к полуопределенной оптимизационной задаче. Целью предложенного алгоритма является минимизация массы пространственной конструкции в соответствии с такими невыпуклыми условиями, как условие прочности и устойчивости. В принципе количество таких условий не ограничивается. В общем случае рассматриваемую проблему можно определить как задачу многокритериальной оптимизации  $\{J_v, J_u, -J_\sigma\} \rightarrow \min$ , где  $J_v$  – функционал объема,  $J_u$  – функционал жесткости,  $J_\sigma$  – функционал прочности. Для поиска оптимальной топологии стержневой системы с оптимальным значением функционала  $J_u$  в работе используется модифицированная задача полуопределенной оптимизации (SDP). Гипотеза, положенная в основу рассматриваемого подхода, состоит в том, что минимизация энергии упругой деформации стержневой системы приводит к геометрически неизменяемой схеме с оптимальным соотношением между объемами стержней. Решение полуопределенной задачи оптимизации топологии стержневой системы задает соотношение между объемами стержней  $v_1:v_2:\dots:v_m$ . Объем каждого стержня можно вычислить как  $t_i = V \cdot v_i$ , где интегральный параметр  $V$ , определяющий значение функционала  $J_v$ , можно получить из дополнительных условий прочности и устойчивости. Условие прочности записывается в соответствии с ДБН В.2.6-198:2014, а критерий устойчивости принимается в виде  $\det K_t > 0$ , где  $K_t$  – касательная матрица жесткости стержневой системы. Для иллюстрации работы предложенного подхода решена задача оптимизации топологии структурной плиты с размерами  $9 \times 8 \times 2$  м и различными вариантами расположения опор.

**Ключевые слова:** топология, оптимизация, стержневая система, структурная плита, момент инерции, кусочно-линейная аппроксимация, устойчивость.

DOI: 10.32434/2521-6406-2019-5-1-9-14

### *Постановка проблемы*

Эффективность пространственных стержневых систем, которые нашли широкое применение в промышленном, гражданском и военном строительстве, в значительной мере зависит от правильно выбранной конструктивной схемы, или – в общем случае – топологии. В свою очередь, задача определения рациональной топологии пространственной системы неразрывно связана с проблемой снижения материалоемкости и обеспечения надежности функционирования конструкции. Зачастую решить такую задачу очень сложно, поэтому обычно

приходится рассматривать множество возможных вариантов. При этом далеко не факт, что среди рассмотренных окажется такой вариант, который обеспечивает минимум расхода материала. Отсюда следует, что во всех таких случаях актуальными становятся оптимизационные алгоритмы, позволяющие решать подобные задачи в более строгой постановке.

### *Анализ последних исследований и публикаций*

Обычно работы, существующие в области оптимального проектирования, либо исследуют сугубо математическую сторону вопроса, или ограничиваются решением инженерных при-

кладных задач. К первой группе можно отнести работы Н.В. Баничука [1], Т. Такады [2], А. Бен-Тала [3]. Так, в [1] аналитически решается задача оптимального проектирования в виде функционалов. В [2] автор рассматривает задачу оптимизации топологии с позиций линейного программирования, а в работе [3] проводится анализ и обоснование проблемы оптимизации стержневых систем, которая представлена как задача полуопределенного программирования.

Из второй группы можно выделить работы В.Б. Гринева [4], А.В. Перельмутера, В.А. Пермякова [5], В.В. Трофимовича [6], С.Ф. Пичугина [7]. В [4] автор, например, рассматривает оптимизацию элементов конструкций по спектру собственных частот. В [5] авторы приводят практические методы решения некоторых оптимизационных задач. В [6] среди прочего рассматривается оптимизация предварительно напряженных металлических конструкций, а в [7] используется вероятностные методы для подбора параметров элементов стальных конструкций.

#### Формулирование цели исследования

В указанных выше работах можно отметить следующие особенности: общие оптимизационные методы малоприменимы для решения реальных технических задач, а инженерные подходы обычно не обеспечивают оптимальность. В большинстве случаев это сводит на нет все усилия по определению эффективной конструктивной схемы.

В работе предлагается алгоритм оптимизации топологии пространственных стержневых систем, который позволяет совместить математический оптимизационный подход с инженерными критериями, в частности с нормативными требованиями к прочности и устойчивости. Цель оптимизационного алгоритма – минимизация материалоемкости при обеспечении выполнения нормативных требований. Известно [8], что затраты на материалы могут достигать 60–70% общей стоимости конструкции из металла, поэтому решение такой задачи является весьма актуальной проблемой.

#### Изложение основного материала

Рассматривая прототип конструкции как полный граф (рис. 1), количество вершин в котором  $n=|Y|$ , а количество ребер  $m=|E|$ , введем следующие обозначения:  $f \in \mathbb{R}^m$ ,  $E \in \mathbb{R}^m$ ,  $L \in \mathbb{R}^m$ ,  $v \in \mathbb{R}^m$  – соответственно осевые силы, возникающие в стержнях, модули Юнга, длины и объемы стержней;  $A \in \mathbb{R}^{3n \times m}$  – матрица уравнений равновесия системы,  $a_i^T$  – ее столбец;  $K \in \mathbb{R}^{3n \times 3n}$  – матрица жесткости системы;  $F \in \mathbb{R}^{3n}$  – внешние

силы, приложенные к узлам конструкции;  $u \in \mathbb{R}^{3n}$  – перемещения узлов.

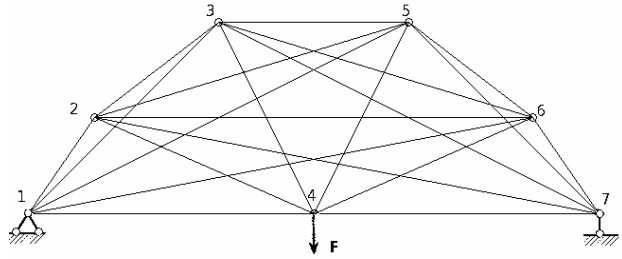


Рис. 1. Пример полного графа-прототипа арочной фермы

Если система находится в равновесии, то уравнение баланса сил можно записать так:

$$Af + F = 0. \quad (1)$$

А осевые силы, возникающие в стержнях, которые подчиняются классической теории Эйлера-Бернулли, описываются уравнением:

$$f_i = \frac{-E_i v_i}{L_i^2} a_i^T u. \quad (2)$$

Перемещения узлов связаны с действием внешних сил следующим равенством:

$$K \cdot u = F, \quad (3)$$

где матрицу жесткости можно представить как:

$$K = \sum_{i=1}^m \frac{E_i v_i}{L_i^2} a_i a_i^T. \quad (4)$$

Работу внешних сил (а значит – и энергию упругой деформации конструкции), связанную с перемещением узлов системы, можно выразить так:

$$W = \frac{1}{2} F^T u. \quad (5)$$

В итоге получается, что для решения оптимизационной задачи необходимо минимизировать две величины:  $W$  и  $\sum_{i=1}^m v_i$ , а задача оптимизации топологии стержневых конструкций может быть представлена в следующем виде:

minimize<sub>u,v</sub> W :

$$\begin{aligned} Ku &= F; \\ \sum_{i=1}^m v_i &\leq V; \\ v &\in R_{\geq 0}^m. \end{aligned} \tag{6}$$

Но такая задача не является выпуклой, поэтому ее необходимо преобразовать, учитывая соотношения (1)–(5). При этом выберем такой ее вид, который бы соответствовал задаче полуопределенной оптимизации [3], так как именно для такого класса проблем разработано наиболее производительное прикладное программное обеспечение (solvers). Можно показать, что для положительно полуопределенной матрицы:

$$\begin{pmatrix} \Omega & F^T \\ F & K \end{pmatrix} \geq 0 \tag{7}$$

существует такой вектор u, который позволит записать эквивалентную систему:

$$\begin{cases} Ku = F; \\ K \geq 0; \\ \Omega \geq W. \end{cases} \tag{8}$$

Более того, можно показать, что в системе с оптимальной топологией соотношение  $v_1:v_2:\dots:v_m$  не зависит от величины V, поэтому сумму  $\sum_{i=1}^m v_i$  сверху можно ограничить 1, что позволяет существенно ускорить общее решение задачи. С учетом вышеперечисленного, задачу (6) можно переопределить к виду:

minimize<sub>Ω,v</sub> Ω :

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m v_i &= 1; \\ v_i &\geq 0 \quad \forall i=1\dots m; \\ \begin{pmatrix} \Omega & F^T \\ F & \sum_{i=1}^m \frac{E_i v_i}{L_i^2} a_i a_i^T \end{pmatrix} &\geq 0. \end{aligned} \tag{9}$$

В таком виде оптимизационная задача становится выпуклой. В результате ее решения определяется оптимальная топология конструкции и соотношения между объемами стержней. Следующий шаг состоит в подборе такого минимального объема материала V (и соответственно площадей сечений), при котором выполнялись бы условия прочности и общей устойчивости системы [9]. Условие прочности может быть записано в виде:

$$\frac{f_i L_i}{V v_i} \leq \gamma R, i=1\dots m, \tag{10}$$

где  $\gamma$  – коэффициент условий работы, R – расчетное сопротивление материала. Общая устойчивость системы определяется критерием:

$$\det K_t > 0, \tag{11}$$

где  $K_t$  – глобальная касательная матрица стержневой системы. Объем каждого стержня определяется из соотношения  $t_i = v_i \cdot V$ .

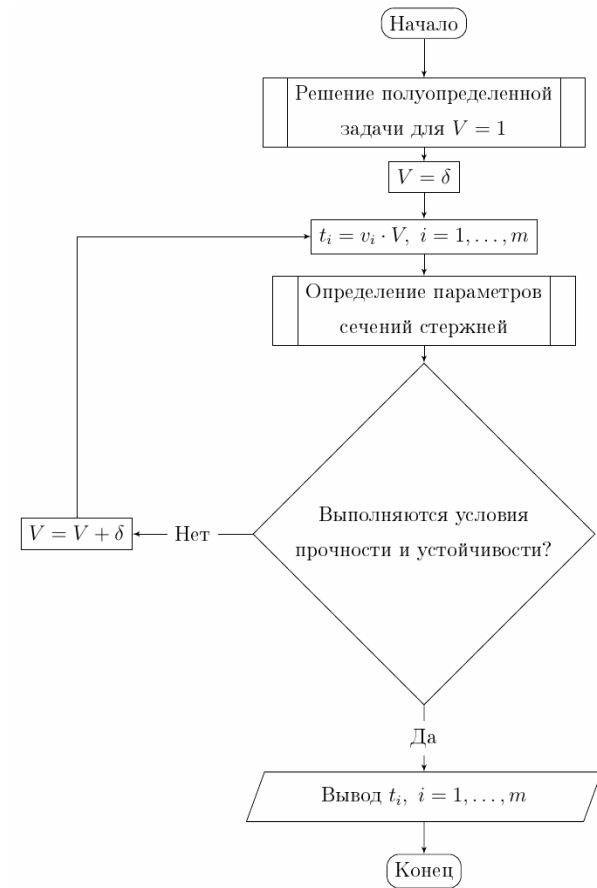


Рис. 2. Блок-схема решения оптимизационной задачи

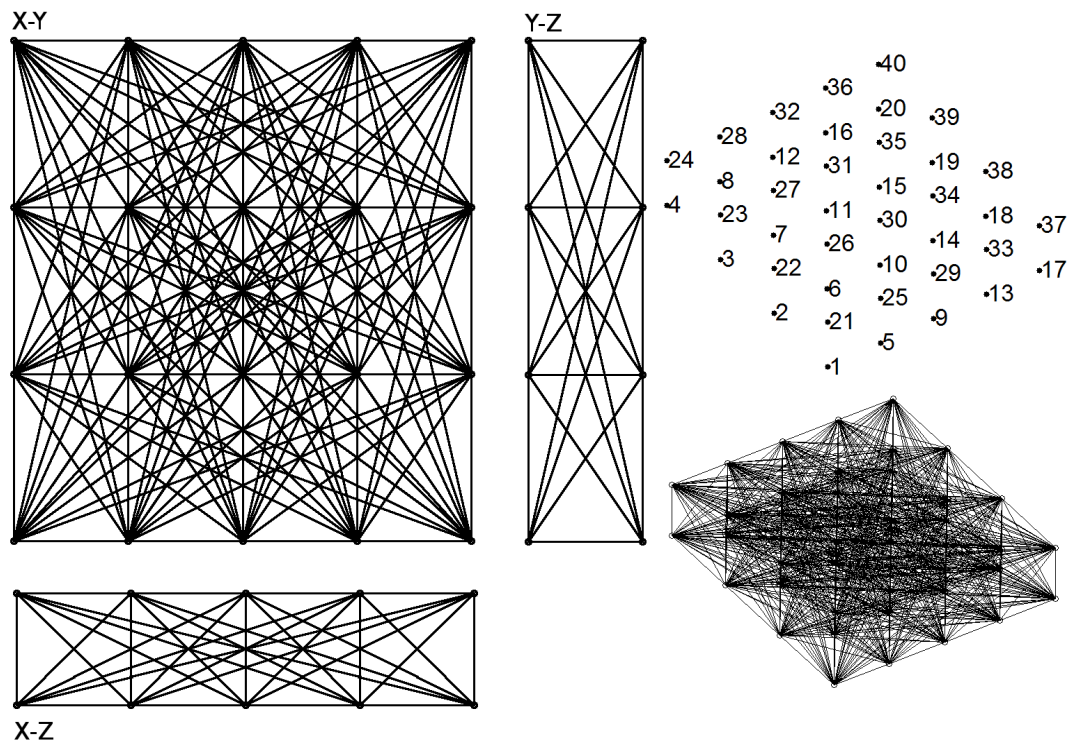


Рис. 3. Узлы и полный граф структурной плиты

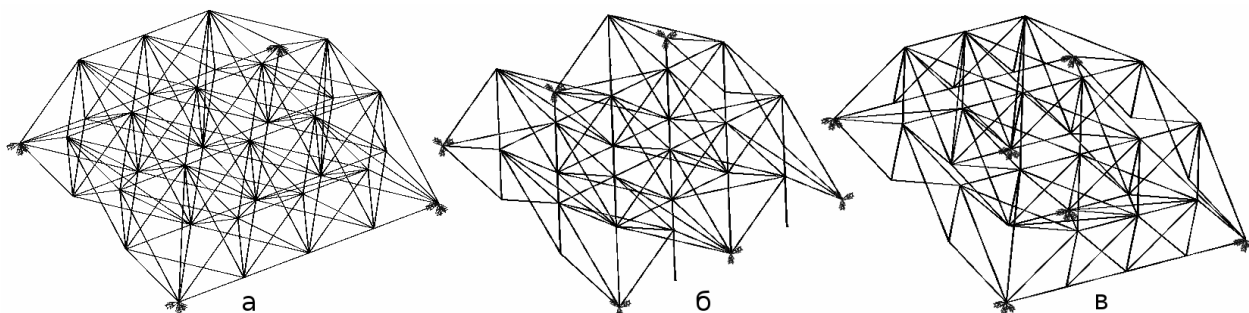


Рис. 4. Оптимальные топологии при различных вариантах расположения опор

На заключительном этапе полученная модель проверяется в программном комплексе ANSYS. В целом, решение оптимизационной задачи можно представить блок-схемой, приведенной на рис. 2.

Рассмотрим пространственную стержневую систему [10] с генеральными размерами 9 м×8 м×2 м. Узлы и полный граф системы изображены на рис. 3. К узлам нижнего пояса 1-20 приложена распределенная нагрузка  $g=10 \text{ кН/м}^2$ .

Проведем численный эксперимент и выясним, как будет меняться оптимальная топология плиты и ее масса при следующих расположениях шарнирно-неподвижных опор: а) по углам в узлах 1, 4, 17, 20; б) в узлах 1, 4, 9, 12, 17, 20; в) в узлах 1, 4, 10, 11, 17, 20.

Модуль Юнга принимался равным  $2 \cdot 10^{11}$  Па, расчетное сопротивление материала –  $2,1 \cdot 10^8$  Па, коэффициент условий работы 0,9. При проверке конструкции на устойчивость для построения касательной матрицы жесткости системы  $K_\tau$  плоские моменты инерции сечений определялись согласно [11]. Проведенное моделирование позволило выявить оптимальные топологические схемы конструкций (рис. 4). При этом массы пространственных стержневых систем для трех вариантов размещения опор составили соответственно 702 кг, 563 кг, 362 кг.

Можно отметить, что при увеличении числа опор уменьшается как масса стержневой системы, так и количество ее стержней, а размещение дополнительных опор в центре конструк-

ции является более эффективным, нежели расположение опор только по периметру.

### Выводы

Приведенная модифицированная форма полуопределенной задачи оптимизации топологии стержневой системы позволяет интегрировать оптимизационную задачу с основными инженерными критериями и за счет этого существенно сократить объем вычислений при решении сложных пространственных систем. Предложенная обобщенная схема решения оптимизационной задачи объединяет математический и инженерный подходы к оптимальному проектированию пространственных стержневых систем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баничук Н.В. Введение в оптимизацию конструкций. – М.: Наука, 1986. – 303 с.
2. Takada T. Multiobjective optimization of truss topology by linear / sequential linear programming method // Journal of Mechanical Engineering and Automation. – 2012. – Vol.2. – P.585-593.
3. Ven-Tal A., Nemirovski A. Robust truss topology design via semidefinite programming // SIAM Journal on optimization. – 1997. – Vol.7. – № 4. – P.991-1016.
4. Гринев В. Б. Оптимизация элементов конструкции по механическим характеристикам. – К.: Наук. думка, 1975. – 294 с.
5. Пермяков В.А., Перельмутер А.В., Юрченко В.В. Оптимальное проектирование стальных стержневых конструкций. – К.: Сталь, 2008. – 538 с.
6. Трофимович В.В., Пермяков В.А. Оптимизация металлических конструкций. – К.: Вища шк., 1983. – 199 с.
7. Пичугин С.Ф., Махенько А.В. К вероятностным методам расчёта металлоконструкций // Сучасні будівельні конструкції з металу і деревини: Зб. наук. пр. – ОДАБА, 2005. – С. 161–171.
8. Кудишин Ю.И., Беленя Е.И., Игнатъева В.С. Металлические конструкции. – М.: Издательский центр «Академия», 2011. – 688 с.

9. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. – К.: Мінрегіон України, 2014. – 199 с.

10. Никитюк А.В., Московкина А.А., Зуева И.И. Достоинства и недостатки структурных конструкций // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2011. – № 1. – С.99-104.

11. Кучеренко А.Е. Аппроксимация момента инерции и поиск оптимальной формы сечения стержня // Системные технологии. – 2016. – Вып.5(106). – С.54-60.

Поступила в редакцию 01.05.2019

## ПОШУК ЕФЕКТИВНОЇ ТОПОЛОГІЇ СТРУКТУРНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ НАПІВВИЗНАЧЕНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

Єгоров Є.А., Кучеренко О.Є.

У статті розглядається задача пошуку оптимальної топології просторових структур. У математичному контексті запропонований підхід об'єднує задачу опуклої оптимізації з додатковими неопуклими умовами та зводить її до напіввизначеної оптимізаційної задачі. Метою запропонованого алгоритму є мінімізація маси просторової конструкції відповідно до таких неопуклих умов, як умова міцності і стійкості. Принципово кількість таких умов необмежена. У загальному випадку проблему, яка розглядається, можна визначити як задачу багатокритеріальної оптимізації  $\{J_v, J_u, -J_\sigma\} \rightarrow \min$ , де  $J_v$  – функціонал об'єму,  $J_u$  – функціонал жорсткості,  $J_\sigma$  – функціонал міцності. Для пошуку оптимальної топології стрижневої системи з оптимальним значенням функціоналу жорсткості  $J_u$  в роботі використовується модифікована задача напіввизначеної оптимізації (SDP). Гіпотеза, що покладена в основу запропонованого підходу, полягає в тому, що мінімізація енергії пружної деформації стрижневої системи призводить до геометрично незмінної схеми з оптимальним співвідношенням між об'ємами стрижнів. Розв'язок напіввизначеної задачі оптимізації топології стрижневої системи задає співвідношення між об'ємами стрижнів  $v_1; v_2; \dots; v_n$ . Об'єм кожного стрижня можна обчислити як  $t_i = V \cdot v_i$ , де інтегральний параметр  $V$ , який визначає значення функціоналу об'єму  $J_v$ , можна отримати з додаткових умов міцності і стійкості. Умова міцності записується відповідно до ДБН В.2.6-198:2014, а критерій стійкості приймається у вигляді  $\det K_r > 0$ , де  $K_r$  – дотична матриця жорсткості стрижневої системи. Для ілюстрації роботи запропонованого підходу розв'язана задача оптимізації топології структурної плити з розмірами  $9\text{ м} \times 8\text{ м} \times 2\text{ м}$  і різними варіантами розташування опор.

**Ключові слова:** топологія, оптимізація, стрижнева система, структурна плита, момент інерції, кусково-лінійна аппроксимация, стійкість.

## FINDING OF EFFECTIVE TOPOLOGY OF SPACE STRUCTURES USING SEMIDEFINITE PROGRAMMING

Egorov E.A., Kucherenko A.E.

Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipro, Ukraine

The paper considers the problem of topology optimization of space truss-like structures. The proposed algorithm combines convex optimization problem with non-convex conditions. The purpose of the algorithm is to minimize the mass of a spatial structure according to such non-convex conditions as structural safety requirement and buckling. Basically, there are no limitations in number of these conditions (convex or non-convex). In general, the problem can be specified as a multicriteria optimization task in following form:  $\{J_v, J_u, -J_\sigma\} \rightarrow \min$ , where  $J_v$  is a functional of volume,  $J_u$  is a functional of stiffness,  $J_\sigma$  is a functional of strength. The stiffness functional  $J_u$  can be defined by means of nodes displacements and energy of a system (compliance). Here to find an optimal truss topology with minimal compliance we use the modified semidefinite optimization problem (SDP), which can be obtained after certain transformations of the non-convex truss topology optimization task. The basic hypothesis is that truss compliance minimization leads to an invariable topology of the truss-like structure with optimal ratio of volumes of truss members. Solution of the semidefinite optimization problem defines the ratio of beams volumes  $v_1, v_2, \dots, v_m$ . A volume of each member can be calculated as  $t_i = V \cdot v_i$ , where the parameter  $V$ , which defines the value of the integral functional  $J_v$ , can be obtained from additional conditions such as strength and buckling. The next important step is approximation of geometric characteristics of cross-sections. We need to calculate area moments of inertia to assemble the stiffness matrix of a structure. This matrix plays a key role in defining of buckling conditions. For simple cross-sections such as «solid circular», «square» calculation of moments of inertia is a trivial problem solved via well-known formulas. For complex cross-sections the dependence of moments of inertia on area is not so simple and may be considered as an ill-posed problem. The condition of strength is recorded in accordance with DBN V.2.6-198:2014, and the buckling condition is determined using the tangent stiffness matrix of a structure as follows:  $\det K_t > 0$ . To illustrate the proposed approach, the problem of topology optimization of a space structure with sides  $9\text{ m} \times 8\text{ m} \times 2\text{ m}$  and different positions of supports has been solved.

**Keywords:** topology, optimization, truss, space structure, moment of inertia, piecewise linear approximation, buckling.

## REFERENCES

1. Banichuk N.V. *Vvedenie v optimizaciju konstrukcij* [Introduction to Structural Optimization]. M: Nauka, 1986, 303 p. (in Russian).
2. Takada T. Multiobjective optimization of truss topology by linear/sequential linear programming method. *Journal of Mechanical Engineering and Automation*, 2012, vol. 2, pp.585-593.
3. Ben-Tal A., Nemirovski A. Robust truss topology design via semidefinite programming. *SIAM Journal on optimization*, 1997, vol. 7, no. 4, pp.991-1016.
4. Grinev V.B. *Optimizacija jelementov konstrukcii po mehanicheskim harakteristikam* [Optimization of structural elements by mechanical characteristics]. Kyiv: Naukovadumka, 1975, 294 p. (in Russian).
5. Permjakov V.A., Perelmutter A.V., Jurchenko V.V. *Optimalnoe proektirovanie stalnyh sterzhnevnyh konstrukcij* [Optimal design of steel trusses]. Kyiv: Stal, 2008, 538 p. (in Russian).
6. Trofimovich V.V., Permjakov V.A. *Optimizacija metallicheskih konstrukcij* (Optimization of metal structures). Kyiv: Vishha shk., 1983, 199 p. (in Russian).
7. Pichugin S.F., Mahinko A.V. K veroyatnostnym metodam raschyota metallokonstrukcij [About probabilistic methods for calculating of metal structures] // Suchasni budivelni konstrukciyi z metalu i derevini: Zb. nauk. pr. – ODABA, 2005. – S. 161–171. (in Russian).
8. Kudishin Yu.I., Belenya E.I., Ignateva V.S. *Metallicheskie konstrukcii* [Metal structures]. – M.: Izdatelskij centr «Akademiya», 2011. – 688 p. (in Russian).
9. DBN V.2.6-198:2014. *Stalevi konstrukcii. Normi proektuvannja* [Steel structures. Design standards]. Kyiv: Minregion Ukrainy, 2014, 199 p. (in Russian).
10. Nikitjuk A.V., Moskovkina A.A., Zueva I.I. *Dostoinstva i nedostatki strukturyh konstrukcij* [Advantages and disadvantages of structural constructions]. *Vestnik PNIPU. Stroitelstvo i arhitektura*, 2011, no. 1, pp.99-104 (in Russian).
11. Kucherenko A.E. Approximation of area moment of inertia for optimal section geometry. *System Technologies*, 2016, Issue 5(106), pp.54-60.



UDC 519.6:004.942

*Zelentsov D.G., Denysiuk O.R.***A METHOD FOR SOLVING PROBLEMS OF BENDING ROD OPTIMIZATION TAKING CORROSION INTO ACCOUNT****Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine**

The article offers and justifies a method for solving a problem of optimal design of bent rods exposed to aggressive media. The problems of such class have special place among the problems of optimal design, which is explained by the fact that modeling corrosion deformation in structural elements requires solving not only the equations of solid mechanics, but also the system of differential equations describing the accumulation of geometric damage and including stress functions. The authors analyze existing approaches to solving these problem and problems of these approaches. On the basis of this analysis a fundamentally different approach to solving some problems of optimal design of bending rod elements that function in aggressive media is proposed, the statement of a problem, the numerical solution of which requires much less computational cost, and the result is the same as for the traditional problem statement, is proposed and justified. The authors consider a problem of vector optimization by two criteria: minimum area and perimeter of a cross-section at the time of exhaustion of the bearing capacity. The objective function includes the weight coefficient  $\omega$ , taking into account the influence of cross-sectional perimeter. A modified scheme for solving the optimization problem is created, which involves a module for one-dimensional optimization by parameter  $\omega$ . The proposed method is based on the assumption that there is only one value of the coefficient of perimeter influence, for which the solutions of problems in both traditional and new statements coincide. To compare these results correctly, it is necessary for a cross-section to be represented in both statements by a set of rectangular fragments both at an initial time and at a time corresponding to the limit state, so the model of corroding equivalent cross-section is used. A numerical illustration demonstrates almost complete coincidence of the solutions for both problem statements. At the same time utilization of developed method allows reducing the computational cost by several orders of magnitude compared to traditional methods for solving problems of this class.

**Keywords:** optimal design, aggressive medium, model of corroding cross-section, system of differential equations.

**DOI:** 10.32434/2521-6406-2019-5-1-15-22

***Statement of the problem***

Problems of optimization of structures exposed to aggressive media have special place among the problems of optimal design. This is explained by the fact that the equations of solid mechanics of are not enough to calculate the constraint functions. The influence of aggressive media causes destruction of a surface layer of metal (corrosive wear) and, consequently, changes in initial geometric characteristics of structural elements. As noted in many works of Ukrainian and foreign researchers, mechanical stresses significantly accelerate the

corrosion process [1–5]. In this case, a model of corrosion deformation of a structure is necessary for calculation of constraint functions. In its most general form, it consists of a system of differential equations (SDU) describing the accumulation of geometric damage and including stress functions, and a system of mechanical equations for calculation of the stress-strain state (SSS). The dimension of a SDU is determined by a number of parameters that allows a researcher to find a unique solution, which defines the geometric characteristics of a structure at any given time. When modeling the process of corrosive deformation in real structures, only the numerical

solution of SDU is possible.

Thus, the problem of optimal design of corroding structures consists of two related tasks: to reduce computational costs and to ensure a required accuracy of the result. Previously, these tasks were accomplished by adapting numerical optimization methods and methods of solving systems of differential equations to the class of problems under consideration, including the creation of error control algorithms based on artificial neural networks (ANNs). This approach has partially solved the problems of accuracy and efficiency, but in general they still remain relevant.

This paper proposes a fundamentally different approach to solving some problems of optimal design of bending rod elements that function in aggressive media. The authors propose and justify the statement of a problem, the numerical solution of which requires much less computational cost, and the result is the same as for the traditional problem statement.

#### ***Analysis of recent research and publications***

As noted above, the main ways to reduce computational costs in solving problems of optimal design of corroding structures were modifications of numerical methods of mathematical programming and methods for solving systems of differential equations. Considering the first approach, it is necessary to note the work [6] dedicated to the modification of the flexible tolerance method. The paper proposed to consider the integration step for SDU (and, consequently, its solution error) as a decreasing function of the iteration number in solving the problem of mathematical programming. This approach significantly reduced the computational cost, especially at the initial iterations, due to the relatively high error in the computation of constraint functions. However, it was impossible to predict a solution error since the influence of factors other than integration step value remained unexplored. These factors are the initial stress value, the parameters of an aggressive medium and the characteristics of cross-sections of rod elements (shape, area and perimeter). Later in [7,8] information about the influence of these factors on the error of SDU solution was formalized using artificial neural networks. The use of ANNs made it possible to determine an integration step value for a SDU while solving the problem, depending on the required accuracy of a solution.

In the last decade, numerical-analytical methods have been used in the calculation of constraint functions [9], increasing efficiency due to a reasonable change in the integration step in the process of solving a SDU.

All of these modifications have improved the efficiency of computations, which allowed the researchers to solve a number of complex applied problems, but in general the problem of optimal design of corroding structures remains relevant.

A characteristic feature of bending rod elements is that corrosion leads to a change not only in size but also in shape of a section [9]. The reason is the uneven distribution of stress across the height of a section. As a result, firstly, the number of parameters that determine the geometric characteristics of a section at random moment of time increases, and, secondly, for a random section, it has not yet been possible to obtain user-friendly analytical dependences that allow a researcher to determine the durability of an element. In the study of such structures, the use of the above modifications of computational procedures is not possible.

The fact of the influence of cross-section perimeter of a bent corroding rod on its optimal parameters was described, for example, in [10]. In this paper a new problem statement, which makes it possible to determine the optimal parameters of a rod with rectangular cross-section, was also proposed.

#### ***Formulation of the research objectives***

As an object of research in this article rod elements (beams) in conditions of pure bending intended for operation in aggressive media are considered. For certainty, we will consider the I-beam. The weight optimization problem is formulated as follows: it is required to determine the dimensions of a beam cross-section so that its area is minimal and for a given time a beam retains its load-bearing capacity. In the form of a problem of nonlinear mathematical programming, this formulation under strength constraints has the form:

$$A(\bar{x}) \rightarrow \min; \quad \bar{x} \in X_D;$$

$$X_D : \{ \bar{x} \in E^n \mid g(\bar{x}) = [\sigma] - \sigma(\bar{x}, t^*) \geq 0 \}. \quad (1)$$

Here  $\bar{x} = [H_0; B_0; D_0; T_0]^T$  is the vector of variable parameters;  $A$  is the cross-sectional area of a rod element;  $\sigma$  and  $[\sigma]$  are the current and the limit values of stress;  $t^*$  is the specified service life.

As a model of geometric damage accumulation, the following differential equation will be used [11,12]:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = v_0 \cdot (1 + k\sigma); \quad \delta_i|_{t=0} = 0, \quad (2)$$

where  $\delta_i$  is the depth of corrosion damage (damage parameter);  $v_0$  is the corrosion rate in the absence of

stress;  $k$  is the coefficient of stress influence on the rate of corrosion process;  $t$  is time.

The possibility of using equation (2) in modeling the processes of corrosion deformation is justified in the monograph [9,13].

The calculation of constraint functions (CF) involves the calculation of the stress state in a cross-section at a given time, taking into account the corrosion process occurring in it.

Models of corroding cross-sections under pure bending conditions are described in detail in [9]. Main provisions necessary to solve the problem are described below.

Two parameters are enough to determine the size and shape of a section at given time:  $\delta_1$  and  $\delta_2$  (Fig. 1).

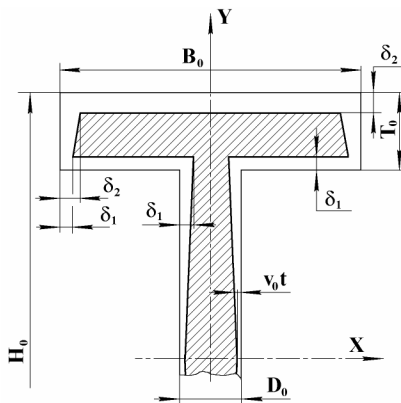


Fig. 1. I-beam cross-section

The system of differential equations for these parameters has a form:

$$\begin{cases} \frac{d\delta_1}{dt} = v_0(1 + k\sigma_1); & \delta_1(0) = 0; \\ \frac{d\delta_2}{dt} = v_0(1 + k\sigma_2); & \delta_2(0) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Stresses  $\sigma_1$  and  $\sigma_2$  are calculated according to formulas:

$$\sigma_1 = \frac{M(H_0 - 2T + 2\delta_1)}{2I};$$

$$\sigma_2 = \frac{M(H_0 - 2\delta_2)}{2I}, \quad (4)$$

where a value of the cross-sectional moment of inertia is determined as follows:

$$I = \frac{1}{12} \left\{ \begin{aligned} & \left[ (H_0 - 2\delta_2)^3 - (H_0 - 2T_0 + 2\delta_1)^3 \right] \times \\ & \times (B_0 - 0,5v_0t - 1,5\delta_2) + \\ & + (H_0 - 2T_0 + 2\delta_1)^3 \times \\ & \times (D_0 - 0,5v_0t - 1,5\delta_1) \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

Thus, the computation of constraint functions in the optimization problem involves solving numerically the system of differential equations (3) together with the equations (4) and (5). A scheme for solving the optimization problem is a two-circuit scheme (Fig. 2) where OF is a module for computation of objective function; CF is a module for computation of constraint function; PR is a module for recalculation of cross-sectional parameters; NLP is a module for solutions of the nonlinear programming problem.

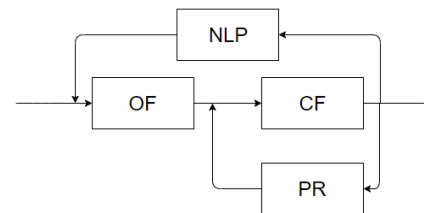


Fig. 2. Two-circuit scheme for solving the optimization problem

The presence of feedback significantly increases a computational cost of solving the optimization problem and sensitivity to errors in the calculation of a constraint function. Nevertheless, it is possible to obtain a strict solution of the optimization problem only in this way.

On the other hand, an alternative approach to solving optimization problems for corroding structures has been used for more than 20 years. It consists in finding an optimal solution for a neutral medium with subsequent restoration of a sacrificial metal layer [14] (Fig. 3).

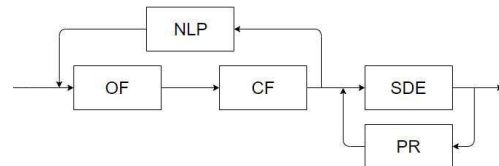


Fig. 3. Scheme for solving the optimization problem with separate sequential circuits

Here SDU is a module for solving a system of differential equations.

Variable parameters in this case are the dimensions of a cross-section at the time of exhaustion of the bearing capacity:

$\bar{x} = [H_t; B_t; D_t; T_t]^T$ . With regard to the object of this study, a formulation of the problem in this approach is the following:

$$A(\bar{x}) \rightarrow \min; \bar{x} \in X_D; \\ X_D : \{ \bar{x} \in E^n \mid g(\bar{x}) = [\sigma] - \sigma(\bar{x}) \geq 0 \}. \quad (6)$$

In this case, the strength constraint can be used as a coupling equation, and formally the problem takes a form of an unconditional optimization problem with three variable parameters. The system of differential equations is solved only once. Despite the fact that the advantages of this approach are obvious from the point of view of computational costs, it is not a complete alternative to the traditional formulation of the problem for the following reasons.

1. In reality, the dimensions of an I-beam cross-section are determined by the structural constraints (the boundaries of variation of the variable parameters) and the coupling equation (the strength constraint), so they are not optimal in the conventional sense of the word. Since the constructive constraints are determined by a person who sets a task, the only solution of the problem (6) does not exist at all.

2. The problem statement (1) assumes that at the initial moment of time a cross-section is represented by rectangular fragments. Since the stress varies linearly in a height of a cross-section, at the moment of exhaustion of the bearing capacity it loses its initial form (Fig. 1). Obviously, when building a sacrificial layer of metal (solution of the system (3) when changing the sign in the right parts) on a cross-section, the dimensions of which will be determined from a solution of the problem (6), at the initial moment of time it won't also be represented by rectangular fragments. Therefore, it is not possible to make a correct comparison of results obtained by solving optimization problems in statements (1) and (6).

3. An optimal solution of the problem in the statement (1) is significantly influenced by the perimeter of a cross-section  $P$ , which is implicitly included in the constraint function. The change in the cross-sectional area  $\Delta A$  due to corrosion will be determined by the formula

$$\Delta A = v_0 \int_0^{t^*} \int_P (1 + k\sigma(P, t)) dP dt. \quad (7)$$

At the same time, the statement (6) completely ignores this fact.

The objective of this work is to develop a method that will allow obtaining the same results as in the statement (1) at minimal computational cost required to solve a problem in the formulation (6).

**An outline of the main research material**

We consider a problem of vector optimization by two criteria: minimum area and perimeter of a cross-section at the time of exhaustion of the bearing capacity:

$$G(\bar{x}) = \omega \frac{P(\bar{x}) - P^-}{P^+ - P^-} + \\ + (1 - \omega) \frac{A(\bar{x}) - A^-}{A^+ - A^-} \rightarrow \min; \bar{x} \in X_D;$$

$$X_D : \{ \bar{x} \in E^n \mid g(\bar{x}) = [\sigma] - \sigma(\bar{x}) \geq 0 \}. \quad (8)$$

Here  $\omega$  is the weight coefficient, taking into account the influence of cross-sectional perimeter ( $\omega \in [0; 1]$ );  $P^-, P^+, A^-, A^+$  is, respectively, the smallest and the largest of values that perimeter and area can take in a given range of variable parameter values.

Same as in the statement (6), found optimal cross-section sizes are increased by a value corresponding to the sacrificial metal layer. Therefore, there is a modified scheme for solving the optimization problem, presented in figure 4, where an additional block ODO is a module for one-dimensional optimization by parameter  $\omega$ .

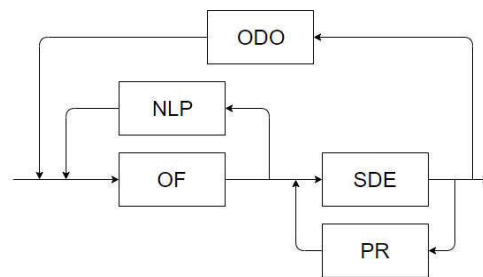


Fig. 4. A modified scheme for solving the optimization problem

The proposed method is based on the following assumption: there is only one value of the coefficient of perimeter influence, for which the solutions of problems in the statements (1) and (8) coincide.

To confirm the validity of this thesis it is necessary to eliminate problems arising while solving the problem in the statement (6).

Problems of constructive constraints and ignoring the perimeter of a cross-section are eliminated by the problem statement itself.

To compare results correctly, it is necessary for a cross-section to be represented in both statements by a set of rectangular fragments both at an initial time and at a time corresponding to the limit state. In this case, it is proposed to use a model of corroding equivalent cross-section – a section that at any time retains its shape, and a value of its moment of inertia is equal to a moment of inertia of a cross-section with a changed shape. This is achieved by introducing a coefficient for stress averaging over a cross-section height. In particular, for the damage accumulation model (2), this coefficient is 0.75. A detailed description for the model of corroding equivalent cross-section is given in [9]. Using this model, a system of differential equations describing the change in size of an I-beam cross-section (Fig. 5) takes the form:

$$\begin{cases} \frac{d\delta_1}{dt} = v_0(1 + k\sigma_1); \delta_1(0) = 0; \\ \frac{d\delta_2}{dt} = v_0(1 + k\sigma_2); \delta_2(0) = 0; \\ \frac{d\delta_{1eq}}{dt} = v_0(1 + 0,75k\sigma_1); \delta_{1eq}(0) = 0; \\ \frac{d\delta_{2eq}}{dt} = v_0(1 + 0,5k(\sigma_1 + \sigma_2)); \delta_{2eq}(0) = 0. \end{cases} \quad (9)$$

When the sacrificial metal layer is restored, signs on the right side of the system (9) are reversed.

The cross-sectional moment of inertia for this model is determined by the formula:

$$I_{eq} = \frac{1}{12} \left\{ \begin{aligned} & \left[ (H_0 - 2\delta_2)^3 - (H_0 - 2T_0 + 2\delta_1)^3 \right] \times \\ & \times (B_0 - 2\delta_{2eq}) + \\ & + (H_0 - 2T_0 + 2\delta_1)^3 (D_0 - 2\delta_{1eq}) \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Fig. 5. Equivalent I-beam cross-section

For a numerical illustration, a beam of I-section was considered, and its geometric dimensions varied in the intervals:  $5.0 \leq H \leq 10.0$  (cm),  $1.0 \leq B \leq 4.0$  (cm),

$0.1 \leq D \leq 2.5$  (cm),  $1.0 \leq T \leq 2.5$  (cm). The value of the bending moment  $M=100$  kN·cm, corrosion rate in the absence of stress  $v_0=0.1$  cm/year, the coefficient of stress influence on the corrosion rate, the ultimate stress  $[\sigma]=240$  MPa. The durability of the structure varied in the range from 1 to 5 years to evaluate the optimal solution with varying degrees of aggressiveness of a medium.

It is obvious that the comparison of results of solving problems (1) and (8)–(9) is possible only when methods of their solution guarantee a global extremum. Since the number of variable parameters is small, the brute force method was used in this paper. The parameters of computational procedures were chosen in such a way that maximum permissible errors in solution of the system of differential equations (9) and optimization problems themselves in both statements were the same. In particular, a spatial grid with the uniform distance between nodes equal to 0.01 of the length of the change interval for each variable parameter was used to solve the global optimization problem by the brute force method. The step for solving the SDE numerically was taken to be  $h_t=0.002t^*$ .

The solution of the problem in the statement (1) was taken as a reference.

In particular, for  $t^*=5.0$  years the following optimal solution for the initial time was obtained:

$$\bar{x} = [7,38; 2,1754; 1,2176; 2,3626]^T; A=13.5117 \text{ cm}^2.$$

At the time of destruction, the dimensions of the cross-section were the following:

$$\bar{x}_t = [6,0725; 0,8679; 0,1001; 1,1304]^T.$$

The maximum stress value in the cross-section was  $\sigma_t=239.99$  MPa. The analysis of the obtained solution leads to the conclusion that an optimal design is determined, among other factors, by a strength restriction and a lower limit for a structural restriction on the parameter D (Fig. 3). Similar conclusions follow from the analysis of solutions obtained for other values of  $t^*$ .

When solving the problem in the statement (8)–(9), the number of variable parameters of the internal optimization problem was reduced to two due to the use of a coupling equation and taking into account the information obtained while solving the previous problem.

The results of solving the internal optimization problem are shown in table 1 for  $t^*=5.0$  years.

The bottom row of the table shows the results of external optimization by parameter  $\omega$ . The internal optimization problem was solved by the method of parabolas.

The discrepancy between the solution results on the value of cross-sectional area at the initial time was 0.32%. This result can be considered quite satisfactory taking into account the fact that in the numerical implementation for both statements there were errors of the brute force method, the solution of systems of differential equations and, for the second formulation, the parabolas method used for external optimization.

Table 1  
Optimal solutions for different values of parameter  $\omega$

$\omega$	H, cm	B, cm	D, cm	T, cm	$A_2$ , cm <sup>2</sup>
0.200	7.75717	2.14737	1.22975	2.22379	13.62059
0.220	7.62171	2.16506	1.22763	2.25665	13.58758
0.240	7.50174	2.18154	1.22542	2.28755	13.56713
0.260	7.39450	2.19697	1.22313	2.31682	13.55690
0.280	7.29791	2.21151	1.22080	2.34471	13.55512
0.300	7.21040	2.22522	1.21841	2.37145	13.56044
0.275	7.32110	2.20796	1.22138	2.33787	13.55486

When solving the problem in the statement (1) with the above parameters of the computational method, SDU (9) was solved numerically 103183209 times, while in the formulation (8)–(9) it was solved only 11 times.

In table 2 the results of solving the problem in two statements with different values of the parameter of medium aggressiveness  $v_0t$  are shown. Here are the optimal values of the coefficient of perimeter influence  $\omega$ , the values of cross-sectional areas:  $A_1$  and  $A_2$  obtained while solving problems in statements (1) and (8)–(9) respectively, and the values of discrepancy of the results.

Table 2  
Optimal solutions for different values of parameter  $v_0t$

$v_0t$ , cm	$\omega$	$A_1$ , cm <sup>2</sup>	$A_2$ , cm <sup>2</sup>	$\epsilon$ , %
0.1	0.106	4.338	4.343	0.12
0.2	0.169	6.665	6.674	0.14
0.3	0.214	8.327	8.342	0.18
0.4	0.248	11.196	11.226	0.27
0.5	0.275	13.512	13.555	0.32

These results confirm almost complete coincidence of the solutions for both problem statements.

### Conclusions

A new method for solving a class of problems of optimal design of corroding structural elements is proposed and justified. It makes it possible to solve the problem of search for optimum parameters of a cross-section as a lower-dimension two-criterion

problem of unconstrained optimization (the criteria are minimum area and perimeter of a cross-section). The solution of this problem is followed by the restoration of a sacrificial metal layer at a given value of the parameter  $\omega$ , which is the coefficient of perimeter influence (internal optimization), and one-dimensional optimization of this parameter (external optimization). Analysis of the results of numerical experiments confirms the fact of reducing the computational cost by several orders of magnitude compared to traditional methods for solving problems of this class. Further increase in efficiency of the proposed method can be achieved, according to the authors, by approximating the dependence of the coefficient of perimeter influence on a degree of aggressiveness of a medium and a value of an applied load. In this case, there is no need to solve the problem of external optimization.

### REFERENCES

1. Baia L., Jiang K., Gao L. The Influence and Mechanism of Residual Stress on the Corrosion Behavior of Welded Structures // Materials Research. – 2018. – Vol.21. – No. 5. – 10 p.
2. Ibrahim R.A. Handbook of Structural Life Assessment. – John Wiley & Sons Ltd, 2017. – 1016 p.
3. Poursaee A. Corrosion of Ti-6Al-4V orthopaedic alloy under stress // Materialia. – 2019. – Vol.6. – 18 p.
4. Василенко О.Г. Оптимізація елементів фермових конструкцій з урахуванням спільної дії силових навантажень та агресивного середовища // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2008. – Вип.12. – С.20-33.
5. Алексеенко Б.Г. Метод дискретной оптимизации стержневых систем, взаимодействующих с агрессивными средами // Системні технології: зб.наук.праць. – Дніпропетровськ. – 2001. – № 5. – С.77-85.
6. Зеленцов Д.Г., Науменко Н.Ю. Адаптация метода скользящего допуска к задачам оптимизации корродирующих конструкций // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпропетровськ, 2005. – Вип.2(37). – С.48-56.
7. Короткая Л.И. Использование нейронных сетей при численном решении некоторых систем дифференциальных уравнений // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 3/4(51). – С.24-27.
8. Радуть О.А. Оптиміальне проектування кородуючих конструкцій з використанням штучних нейронних мереж // Промислове будівництво та інженерні споруди. – К.: ТОВ - «Український інститут сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського», 2012. – № 1. – С.16-18.
9. Зеленцов Д.Г., Ляшенко О.А., Науменко Н.Ю. Информационное обеспечение расчётов корродирующих объектов.

Математические модели и концепция проектирования систем. – Днепропетровск: УГХТУ, 2012. – 264 с.

10. Радуга А.А. Нейросетевая идентификация двух схем решения задачи оптимизации корродирующих балок // Вісник ПБАДА. – 2012. – № 6. – С.18-23.

11. Долинский В.М. Изгиб тонких пластин, подверженных коррозионному износу // Динамика и прочность машин. – 1975. – № 21. – С.16-19.

12. Науменко Н.Ю., Ляшенко О.А. Математичні моделі процесу корозії в задачах будівельної механіки кородуючих конструкцій // Вопросы химии и химической технологии. – 2010. – № 6. – С.144-147.

13. Філатов Г.В. Основы эволюционной теории идентификации математических моделей коррозионного руйнування. – Дніпропетровськ, УДХТУ. – 2010. – 191 с.

14. Василенко О.Г., Дзюба А.П. Алгоритм оптимального проектирования кольцевых пластин за оцінкою кінцевого стану з урахуванням впливу агресивного середовища // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб.наук.праць. – Дніпропетровськ: Ліра, 2011. – Вип.16. – С.79-85.

Received 28.05.2019

#### МЕТОД РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ОПТИМІЗАЦІЇ ЗГІННИХ СТРИЖНІВ З УРАХУВАННЯМ КОРРОЗИЙНОГО ЗНОСУ

Зеленцов Д.Г., Денисюк О.Р.

У статті пропонується і обґрунтовується метод розв'язання задачі оптимального проектування згинних стрижнів, що знаходяться під впливом агресивних середовищ. Задачі такого класу займають особливе місце серед задач оптимального проектування, що пояснюється тим, що моделювання корозійної деформації в елементах конструкції вимагає розв'язання не тільки рівнянь механіки твердого тіла, але і системи диференціальних рівнянь, що описують накопичення геометричних пошкоджень і включають в себе функції напружень. Автори аналізують існуючі підходи до розв'язання подібних задач і проблеми, що виникають при їх використанні. На основі виконаного аналізу запропоновано принципово інший підхід до розв'язання деяких задач оптимального проектування згинних стрижневих елементів, що функціонують в агресивних середовищах, а також запропоновано і обґрунтовано постановку задачі, чисельний розв'язок якої вимагає набагато менших обчислювальних витрат, а результат збігається з традиційною постановкою. Автори розглядають задачу векторної оптимізації за двома критеріями: мінімальної площі і периметра поперечного перерізу в момент вичерпання несучої здатності. Цільова функція включає в себе ваговий коефіцієнт  $\omega$ , що враховує вплив периметра поперечного перерізу. Створена модифікована схема розв'язання задачі оптимізації, що включає модуль одновимірної оптимізації за параметром  $\omega$ . Запропонований спосіб заснований на припущенні, що існує тільки одне значення коефіцієнта впливу периметра, при якому розв'язки задачі як в традиційній, так і в новій постановках збігаються. Для правильного порівняння цих результатів необхідно, щоб переріз було надано в обох постановках набором прямокутних фрагментів як в початковий момент часу, так і в момент, що відповідає граничному стану, тому використовується модель кородуючого еквівалентного перерізу. Чисельна ілюстрація демонструє майже повний збіг розв'язків для обох постановок задачі. У

той же час, використання розробленого методу дозволяє знизити обчислювальні витрати на кілька порядків в порівнянні з традиційними методами розв'язання задач цього класу.

**Ключові слова:** оптимальне проектування, агресивне середовище, модель кородуючого перерізу, система диференціальних рівнянь.

#### МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ИЗГИБАЕМЫХ СТЕРЖНЕЙ С УЧЕТОМ КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА

Зеленцов Д.Г., Денисюк О.Р.

В статье предлагается и обосновывается метод решения задачи оптимального проектирования изгибаемых стержней, подверженных воздействию агрессивных сред. Задачи такого класса занимают особое место среди задач оптимального проектирования, что объясняется тем, что моделирование коррозионной деформации в элементах конструкции требует решения не только уравнений механики твердого тела, но и системы дифференциальных уравнений, описывающих накопление геометрических повреждений и включающих в себя функции напряжений. Авторы анализируют существующие подходы к решению подобных задач и возникающие при их использовании проблемы. На основе проведенного анализа предложено принципиально иной подход к решению некоторых задач оптимального проектирования изгибаемых стержневых элементов, функционирующих в агрессивных средах, а также предложена и обоснована постановка задачи, численное решение которой требует гораздо меньших вычислительных затрат, а результат совпадает с традиционной постановкой. Авторы рассматривают задачу векторной оптимизации по двум критериям: минимальной площади и периметру поперечного сечения в момент исчерпания несущей способности. Целевая функция включает в себя весовой коэффициент  $\omega$ , учитывающий влияние периметра поперечного сечения. Создана модифицированная схема решения задачи оптимизации, включающая модуль одномерной оптимизации по параметру  $\omega$ . Предлагаемый способ основан на предположении, что существует только одно значение коэффициента влияния периметра, при котором решение задачи как в традиционной, так и в новой постановках совпадают. Для правильного сравнения этих результатов необходимо, чтобы сечение было представлено в обеих постановках набором прямоугольных фрагментов как в начальный момент времени, так и в момент, соответствующий предельному состоянию, поэтому используется модель корродирующего эквивалентного сечения. Численная иллюстрация демонстрирует почти полное совпадение решений для обеих постановок задачи. В то же время, использование разработанного метода позволяет снизить вычислительные затраты на несколько порядков по сравнению с традиционными методами решения задач этого класса.

**Ключевые слова:** оптимальное проектирование, агрессивная среда, модель корродирующего сечения, система дифференциальных уравнений.

## A METHOD FOR SOLVING PROBLEMS OF BENDING ROD OPTIMIZATION TAKING CORROSION INTO ACCOUNT

Zelentsov D.G., Denysiuk O.R.

Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

The article offers and justifies a method for solving a problem of optimal design of bent rods exposed to aggressive media. The problems of such class have special place among the problems of optimal design, which is explained by the fact that modeling corrosion deformation in structural elements requires solving not only the equations of solid mechanics, but also the system of differential equations describing the accumulation of geometric damage and including stress functions. The authors analyze existing approaches to solving these problem and problems of these approaches. On the basis of this analysis a fundamentally different approach to solving some problems of optimal design of bending rod elements that function in aggressive media is proposed, the statement of a problem, the numerical solution of which requires much less computational cost, and the result is the same as for the traditional problem statement, is proposed and justified. The authors consider a problem of vector optimization by two criteria: minimum area and perimeter of a cross-section at the time of exhaustion of the bearing capacity. The objective function includes the weight coefficient  $\omega$ , taking into account the influence of cross-sectional perimeter. A modified scheme for solving the optimization problem is created, which involves a module for one-dimensional optimization by parameter  $\omega$ . The proposed method is based on the assumption that there is only one value of the coefficient of perimeter influence, for which the solutions of problems in both traditional and new statements coincide. To compare these results correctly, it is necessary for a cross-section to be represented in both statements by a set of rectangular fragments both at an initial time and at a time corresponding to the limit state, so the model of corroding equivalent cross-section is used. A numerical illustration demonstrates almost complete coincidence of the solutions for both problem statements. At the same time utilization of developed method allows reducing the computational cost by several orders of magnitude compared to traditional methods for solving problems of this class.

**Keywords:** optimal design, aggressive medium, model of corroding cross-section, system of differential equations.

### REFERENCES

- Baia L., Jiang K., Gao L. *The Influence and Mechanism of Residual Stress on the Corrosion Behavior of Welded Structures*. *Materials Research*, 2018, vol. 21, no. 5. Available at: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-14392018000500219&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392018000500219&lng=en&nrm=iso).
- Ibrahim R.A. *Handbook of Structural Life Assessment*. John Wiley & Sons Ltd, 2017. 1016 p.
- Poursaee A. *Corrosion of Ti-6Al-4V orthopaedic alloy under stress*. *Materialia*, 2019, vol. 6. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589152919300675?via%3Dihub>
- Vasylenko O.G. *Optyimizacija elementiv fermovyh konstrukcij z urahuvannjam spil'noi' dii' sylovyh navantazhen' ta agresyvnogo seredovyshha* [Optimization of truss structural elements taking into account the joint action of loads and aggressive medium]. *Problemy obchysljuval'noi' mehaniky i micnosti konstrukcij: zbirnyk naukovykh prac'* [Problems of computational mechanics and durability of structures: a collection of scientific works], Dnipropetrovsk, Lira, 2008, no. 12, pp. 20-33.
- Alekseyenko B.G. *Metod diskretnoj optimizacii sterzhnevnyh sistem, vzaimodejstvujushchih s agresivnymi sredami* [Method of discrete optimization of rod systems interacting with aggressive media]. *Systemni tehnologii': zbirnyk naukovykh prac'* [System technologies: a collection of scientific works], 2001, no. 5, pp. 77-85.
- Zelentsov D.G., Naumenko N.Yu. *Adaptacija metoda skol'zjashhego dopuska k zadacham optimizacii korrodirujushchih konstrukcij* [Adaptation of the flexible tolerance method for problems of optimization of corroding structures]. *Systemni tehnologii': zbirnyk naukovykh prac'* [System technologies: a collection of scientific works], 2005, no. 2(37), pp. 48-56.
- Korotkaya L.I. *Ispol'zovanie nejronnyh setej pri chislennom reshenii nekotoryh sistem differencial'nyh uravnenij* [Use of neural networks for solving numerically some systems of differential equations]. *Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologii* [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies], 2011, no. 3/4(51), pp. 24-27.
- Radul O.A. *Optymal'ne proektuvannja korodujuchykh konstrukcij z vykorystannjam shtuchnyh nejronnyh mrezezh* [Optimal design of corrosion structures using artificial neural networks]. *Promysove budivnytvo ta inzhenerni sporudy* [Industrial building and engineering structures], 2012, no. 1, pp. 16-18.
- Zelentsov D.G., Liashenko O.A., Naumenko N.Yu. *Informatsionoe obespechenie raschetov korrodiruyushchikh ob'ektov. Matematicheskie modeli i kontseptsiya proektirovaniya sistem* [Information support for calculations of corrosive objects. Mathematical models and concept of systems design]. Dnepropetrovsk: Ukrainian State University of Chemical Technology Publ., 2012. 264 p. (in Russian). DOI: 10.32434/mono-1-ZDG-LOA-NNY
- Radul A.A. *Nejrosetevaja identifikacija dvuh shem reshenija zadachi optimizacii korrodirujushchih balok* [Neural network identification of two schemes to solve the optimization problem of corroding beams]. *Visnyk PDABA* [Bulletin of PSACEA], 2012, no. 6, pp. 18-23.
- Dolinskiy V.M. *Izhib tonkih plastin, podverzhennyh korrozionnomu iznosu* [Bending of thin plates subject to corrosive wear]. *Dinamika i prochnost' mashin* [Dynamics and strength of machines], 1975, no. 21, pp. 16-19.
- Naumenko N.Yu., Liashenko O.A. *Matematychni modeli procesu koroziji v zadachah budivel'noi' mehaniky korodujuchykh konstrukcij* [Mathematical models of corrosion process in problems of construction mechanics of corrosion structures]. *Voprosy himii i himicheskoy tehnologii* [Issues of Chemistry and Chemical Technology], 2010, no. 6, pp. 144-147.
- Filatov G.V. *Osnovy evolyucijnoi' teorii' identyfikacii matematychnykh modelej korozijnogo rujnuvannja* [Fundamentals of evolutionary theory for identification of mathematical models of corrosion destruction]. USUCT, Dnipropetrovsk, 2010. 191 p.
- Vasylenko O.G., Dzyuba A.P. *Algorytm optymal'nogo proektuvannja kil'cevnyh plastyn za ocinkoju kincevogo stanu z urahuvannjam vplyvu agresyvnogo seredovyshha* [Algorithm for optimal design of ring plates by estimating the finite state, taking into account the influence of an aggressive medium]. *Problemy obchysljuval'noi' mehaniky i micnosti konstrukcij: zbirnyk naukovykh prac'* [Problems of computational mechanics and durability of structures: a collection of scientific works], Dnipropetrovsk, Lira, 2011, no. 16, pp. 79-85.



УДК 519.8

*Коряшкіна Л.С., Беляєв О.Р.***ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ КІЛЬКОСТІ ТА МІСЦЬ РОЗМІЩЕННЯ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ НА ТЕРИТОРІЇ МІСТА****Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна**

В роботі розглядається задача оптимального розміщення зарядних станцій для електромобілів у м. Дніпро у припущенні, що такими станціями варто обладнати насамперед існуючі майданчики для паркування автотранспорту. На основі результатів аналізу ринку електромобілів як в цілому по Україні, так і в самому м. Дніпро, числа власників електричних автомобілів, технічних параметрів електромобілів і зарядок, а також параметрів роботи вже функціонуючих на території міста зарядних станцій спочатку вирішується питання про раціональну кількість зарядних станцій, які потрібно розмістити за для задоволення поточного попиту. Далі, з урахуванням транспортної інфраструктури міста, серед функціонуючих автостоянок здійснюється пошук в розрахованій кількості тих, де найбільш раціонально (за територіальним критерієм) встановити зарядні пристрої. Тобто метою оптимізації є мінімізація відстані від найвіддаленішого майданчика для паркування автотранспорту до найближчої зарядної станції. Визначення оптимальної кількості зарядних станцій в місті Дніпро, що забезпечує мінімальні сумарні втрати від простою постів та відмов на обслуговування, здійснено, застосовуючи моделі і методи теорії масового обслуговування. Виконаний аналіз таких параметрів системи масового обслуговування, як потік заявок і можлива продуктивність каналів. Реалізація системи масового обслуговування здійснена мовою програмування C++ за наступних вихідних умов. Розрахунок оптимальної кількості зарядних пістолетів на території міста здійснюється у припущенні, що у вартісному вираженні дохід від експлуатації одного зарядного пістолета і витрати на його утримання при вимушеному простої майже ті самі. А коефіцієнт чистого доходу зарядної станції для електромобілів є пропорційним різниці між середньою кількістю електромобілів, що обслуговуються системою, та числом пістолетів, що вимушено простоюють. Для розв'язання задачі комбінаторної оптимізації використовується наближений алгоритм штучної імунної системи.

**Ключові слова:** електромобілі, зарядні станції, оптимальне розміщення, комбінаторна оптимізація, імунні системи, геоінформаційні технології.

**DOI:** 10.32434/2521-6406-2019-5-1-23-29

***Постановка проблеми***

Формування умов сталого розвитку Дніпропетровського регіону потребує гармонійного поєднання економічної, соціальної та екологічної мети розвитку соціальної інфраструктури, досягнення якої передбачає модернізацію регіональної інфраструктури з урахуванням потреб розвитку людського потенціалу промислового регіону [1]. Перспективними для досягнення сталого розвитку регіону виступають кроки, спрямовані на підсилення конкурентних пере-

ваг розвитку регіональної соціальної інфраструктури, що передбачає узгодження напрямів розвитку малого та середнього бізнесу з пріоритетними напрямами розвитку сфери послуг у регіоні; підвищення ефективності використання науково-освітнього потенціалу регіону у впровадженні інноваційних технологій розвитку соціальної інфраструктури та ін. Одним з пріоритетних напрямів мінімізації ризиків соціально-економічного розвитку, а отже, й просування Дніпропетровського регіону в бік реалізації цілей сталого розвитку Дніпро-2030 в екологічній

© Коряшкіна Л.С., Беляєв О.Р., 2019

підсистемі є зменшення викидів шкідливих речовин у повітря. Серед іншого в [1] запропоновано розвивати якісну, надійну, сталу та доступну інфраструктуру, яка базується на використанні інноваційних технологій, у т.ч. екологічно чистих видів транспорту.

Найбільш перспективними технологіями щодо зниження викидів парникових газів є електромобілі, які включають гібриди зі змінними модулями і автомобілі з акумуляторами. Попит на машини, що мають замість двигуна внутрішнього згоряння акумуляторну батарею, стрімко зростає, оскільки, у порівнянні з автомобілями на органічному паливі, окрім відсутності шкідливих вихлопів, які є одним з головних елементів забруднення навколишнього середовища, електромобілі мають такі переваги: надійність і довговічність двигуна при тривалій експлуатації; високий коефіцієнт корисної дії; можливість зарядки акумуляторів від стандартної електричної мережі. Останній аспект свідчить про те, що електромобіль (ЕМ) дозволяє значно економити на витратах, особливо в нічні часи.

За даними сайту IRS Group лише з січня по квітень 2019 року кількість автомобілів в країні збільшилась на 13,1% і на перше квітня становила 12119 електромобілів. Кількість електромобілів в м. Дніпро також збільшується щомісяця. В межах міста одним із сегментів, в яких вже використовуються електромобілі, є вантажні та персональні перевезення.

З оглядом на те, що акумуляторні батареї забезпечують пробіг електромобілів від 160 до 240 км без підзарядки, їх важко вважати придатними для тривалих поїздок, особливо з урахуванням відсутності станцій підзарядки. Саме нерозвинену інфраструктуру зарядних станцій вважають одним з недоліків ЕМ на даний момент. І це дійсно серйозна проблема в експлуатації, оскільки залишитися стояти на дорозі з акумулятором, що розрядився, – зовсім небажана подія для водія. Зазвичай для повного зарядження електромобіля потрібно близько 8–10 годин. Отже, може знадобитися спеціальна станція для підзарядки, на якій електромобіль зможе перебувати протягом цього часу.

На даний момент в Дніпрі нараховується близько 20 зарядних станцій. Розташовані вони, в основному, поблизу торгових центрів, автосалонів, на деяких заправках і великих автостоянках. Але їх має бути значно більше. З 1 липня 2019 року вступають в дію такі нормативи: мінімум 5% місць на паркових майданчиках міста Дніпра мають бути оснащені станціями для за-

рядки електромобілів. А протягом наступних 11 років планується обладнати такими станціями всі автомайданчики в Україні.

Отже, оскільки масове впровадження ЕМ на даний час утруднене технічними обмеженнями, пов'язаними з дистанцією пересування та тривалим часом зарядки акумулятора, актуальною проблемою є визначення раціонального числа зарядних станцій в межах міста або регіону та їх розміщення.

В даній роботі, по перше, вирішується питання про оптимальну кількість зарядних станцій, які потрібно розмістити у місті Дніпро аби задовольнити поточний попит, використовуючи елементи теорії масового обслуговування. По-друге, ставиться і розв'язується задача оптимального (за територіальним критерієм) розміщення зарядних пристроїв у припущенні, що їх варто розташовувати на майданчиках для паркування транспортних засобів.

#### *Огляд останніх досліджень і публікацій*

Питання, пов'язані з оптимальним розміщенням зарядних станцій для електромобілів, протягом останнього десятиліття розглядалися багатьма вченими та практиками як вітчизняними, так і зарубіжними.

Так, цікавою з точки зору прикладних застосувань виявилася робота [2], де поряд з моделлю оптимізації загальних витрат системи електричних таксі розглядається задача оптимізації компонування зарядної інфраструктури з урахуванням попиту на пасажирські перевезення та потреби у зарядженні.

Проблема зарядження електромобілів у Японії розглядається в [3]. Тут автори, концентрують увагу на малому пробігу електромобілів (у середньому 160 км), який не дозволяє здійснювати далекі подорожі без достатньої кількості зарядних станцій, і тому пропонується встановлювати зарядні прилади на місцях зупинки біля доріг, що надасть змогу власникам електромобілів подорожувати Японією вільно, не хвилюючись за заряд свого електротранспорту.

В роботі [4] розглядаються питання, пов'язані з розміщенням зарядних станцій у критичних місцях декількох районів Стамбула. Використовуючи метод аналізу ієрархій, автори оцінюють вагу кожного альтернативного місця розташування з подальшим їх ранжуванням. Надалі, ці ваги використовуються у якості вхідних даних для математичної моделі задачі визначення кількості зарядних станцій, що мають бути встановлені.

У роботі [5] за допомогою статистичних

методів та теорії масового обслуговування розраховуються параметри, які є ключовими при виборі типів зарядних станцій для електромобілів. У статті виконані розрахунки відносно двох різних типів станцій: малої, з можливістю швидкого зарядження, і великої, де час зарядженого одного електромобіля значно більший.

Деякі науковці пропонують розглядати в якості можливих місць для розташування станцій зарядки електромобілів і сервісів з заміни акумуляторних батарей традиційні мережі автозаправних станцій (наприклад, в роботі [6]). Обґрунтовують таке рішення зменшенням вартості та використанням землі на побудову зарядних та акумуляторних станцій.

Незважаючи на численність публікацій, присвячених проблемам оптимального розміщення зарядних станцій та пунктів технічного обслуговування електромобілів, актуальним напрямом наукових досліджень залишається виявлення раціональних місць розташування зарядних станцій для ЕМ в межах одного міста на базі використання сучасних методів оптимізації та інформаційних технологій.

**Мета дослідження**

Об’єктом дослідження є система масового обслуговування (СМО) власників електромобілів. Предметом дослідження є показники ефективності роботи СМО, а також пошук найкращих місць розташування станцій для зарядження акумуляторів електромобілів. Метою досліджень є зниження витрат на закупівлю і установку зарядних станцій в кількості, достатній для задоволення поточного попиту з оглядом на те, що масове використання електромобілів при здійсненні і вантажних, і персональних перевезень є ключовим стратегічним питанням з точки зору енергетичної безпеки як для України в цілому, так і в межах міста Дніпра.

**Постановка задачі**

На основі статистичних даних про кількість електромобілів і функціонуючих зарядних станцій в м. Дніпро, оцінити кількість N зарядних станцій, що мають бути розміщені на території міста в найближчий час, достатню для забезпечення потреб у таких станціях за умови якомога менших витрат від простою технологічного обладнання.

У припущенні, що зарядними пристроями мають бути оснащені насамперед майданчики для паркування транспортних засобів (у тому числі і електромобілів), знайти N автостоянок в м. Дніпро для обладнання їх зарядними станціями такі, щоб максимальна відстань від будь-

якої з них до найближчої зарядної станції була мінімальною.

**Виклад основного матеріалу**

Визначення оптимальної кількості зарядних станцій в місті Дніпро, що забезпечує мінімальні сумарні втрати від простою постів та відмов на обслуговування, здійснено, застосовуючи моделі і методи теорії масового обслуговування. При цьому проведений аналіз таких параметрів СМО, як потік заявок та можлива продуктивність каналів. Введемо наступні позначення: m – інтенсивність обслуговування, яка розраховується як  $1/\text{charging\_time}$ , де  $\text{charging\_time}$  – час обслуговування одного електромобіля (годин); l – інтенсивність потоку машин, яка розраховується за формулою  $l/(\text{station\_time}/\text{number\_cars})$ , де  $\text{station\_time}$  – час роботи станції,  $\text{number\_cars}$  – кількість автомобілів, які заряджаються в один день; c – навантаження однієї зарядної станції, яке дорівнює частці  $l/m$ . Інші показники ефективності роботи системи масового обслуговування і формули для їх обчислення наведені в табл. 1. Реалізація системи масового обслуговування здійснена мовою програмування C++ за наступних вихідних даних. Згідно з сайтом IRS Group, у місті Дніпро станом на 01.04.2019 нараховується 1256 електромобілів та гібридів. Повний заряд акумулятора можна отримати після чотирьох годин неперервної зарядки. Електрокар потрібно заряджати в середньому кожні три дні.

Таблиця 1  
**Показники ефективності СМО**

Назва показника ефективності СМО	Формула для розрахунку
Граничні ймовірності станів відкритої СМО без черги (формули Ерланга)	$p_0 = \left( \sum_{k=0}^N \frac{\rho^k}{k!} \right)^{-1}, p_k = \frac{\rho^k}{k!} p_0$
Ймовірність відмови	$p_{\text{відм}} = \frac{\rho^N}{n!} p_0$
Відносна пропускна спроможність	$Q = 1 - p_{\text{відм}} = 1 - \frac{\rho^N}{n!} p_0$
Абсолютна пропускна спроможність	$A = \lambda q = \lambda \left( 1 - \frac{\rho^N}{n!} p_0 \right)$
Середня кількість ЕМ, що заряджаються	$\bar{k} = \sum_{k=0}^N k p_k$
Середня кількість незадіяних зарядних пістолетів	$M = N - \bar{k}$
Коефіцієнт доходу	$W = \bar{k} - M$

Таблиця 2

## Показники ефективності роботи СМО

Кількість зарядних пістолетів	Абсолютна пропускна спроможність, ЕМ/год	Відносна пропускна спроможність	Ймовірність відмови	Середня кількість ЕМ, що заряджаються	Середня кількість незадіяних зарядних пістолетів	Дохід, умов грош. один.
1	0,246	0,014	0,985	0,985	0,014	0,971
2	0,492	0,028	0,971	1,971	0,028	1,942
3	0,739	0,042	0,958	2,956	0,044	2,913
...	...	...	...	...	...	...
71	16,048	0,921	0,079	64,193	6,807	57,386
72	16,186	0,929	0,070	64,744	7,255	57,489
<b>73</b>	<b>16,316</b>	<b>0,936</b>	<b>0,063</b>	<b>65,266</b>	<b>7,734</b>	<b>57,531</b>
74	16,439	0,943	0,056	64,756	8,243	57,512
75	16,553	0,950	0,049	66,214	8,785	57,428

Результати розрахунків всіх зазначених показників ефективності роботи системи масового обслуговування при змінній кількості зарядних пістолетів наведені в табл. 2.

Тут передбачається, що у вартісному вираженні дохід від експлуатації одного зарядного пістолета і витрати на його утримання при вимушеному простої майже ті самі, а чистий дохід зарядної станції для ЕМ є пропорційним різниці між відносною пропускною спроможністю, тобто середньою долею ЕМ, що обслуговуються системою, та числом пістолетів, що вимушено простоюють.

Аналіз результатів розрахунків показує, що чим більше зарядних пістолетів, тим більша кількість власників електромобілів може користатись послугами з зарядження авто. Однак, зі значним зростанням кількості пристроїв збільшується кількість таких, які вимушено простоюють, і отже, зростають непродуктивні витрати на їх утримання. Оптимальна кількість зарядних пістолетів для станцій – 73. З такою кількістю зарядних пристроїв 93% власників електромобілів, що потребують зарядки, зможуть отримати відповідну послугу.

Поставлена задача про оптимальне розміщення зарядних станцій для ЕМ на території м. Дніпро є задачею комбінаторної оптимізації (задача про покриття на графі). За невеликої розмірності вона може бути розв'язана повним перебором, в іншому випадку використовують наближені алгоритми – еволюційні, ройові, послідовні алгоритми, інші методи.

Наведемо математичну постановку задачі. Будемо використовувати такі позначення:  $X$  – множина всіх автостоянок, кожна з яких надана своїми географічними координатами

$x^m = (x_1^m, x_2^m)$ ,  $m=1, 2, \dots, M$ , отже  $|X|=M$ ;  $M^*=\{1, 2, \dots, M\}$  – множина індексів елементів з  $X$ ;  $\Sigma_J^N$  – множина всіляких комбінацій із  $M$  елементів по  $N$  елементів,  $\sigma_i = \{j_1^i, j_2^i, \dots, j_N^i\}$  – елемент множини  $\Sigma_J^N$ ,  $|\Sigma_J^N| = C_M^N$ ;  $c(x^m, x^k)$  – відстань між автостоянками  $x^m, x^k$ ,  $m \neq k$ ,  $m, k \in M$ .

Потрібно знайти таке  $\sigma^* \in \Sigma_J^N$ , за якого набуває мінімального значення наступна величина:

$$R(\sigma) = \max_{m \in M^*} \min_{k \in \sigma} c(x^m, x^k).$$

Тобто величина  $R(s)$  для кожного фіксованого набору  $N$  існуючих майданчиків для паркування автомобілів визначає найбільшу відстань від будь-якої автостоянки до найближчого майданчику із зарядним пристроєм.

Вхідною інформацією для задачі є матриця найближчих відстаней між кожною парою майданчиків, яка побудована за допомогою сервісу Google API. Якщо припустити, що зарядні станції мають три зарядні пістолети, тобто кожен канал СМО має три пости, то, виходячи з попередньо отриманих результатів, в місті Дніпро має бути 24 таких станцій. Оскільки розмірність задачі за таких даних велика, розв'язок задачі отриманий за допомогою наближеного алгоритму штучної імунної системи, а саме алгоритму клонального відбору (CLONALG) [7], блок схему якого наведено на рис. 1.

Алгоритм реалізовано за допомогою мов програмування R та C++. Він маніпулює векто-



Рис. 1. Блок-схема алгоритму CLONALG

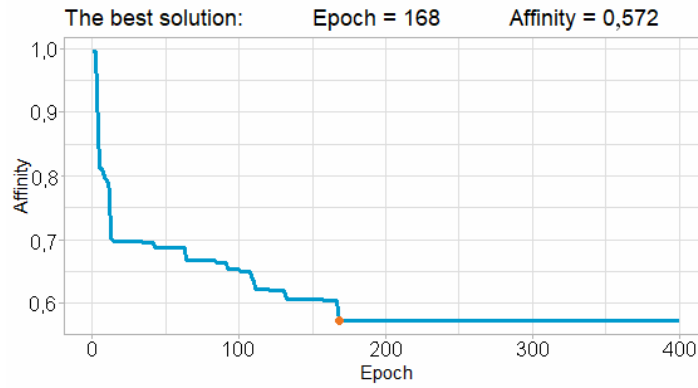


Рис. 2. Результати розрахунків штучної імунної системи



Рис. 3. Оптимальне розміщення 24 зарядних станцій в м. Дніпро

ром дійсних чисел, де кожен елемент – це номер автомобільного майданчика, на який необхідно встановити зарядну станцію. Довжина вектору дорівнює кількості зарядних пристроїв, які

необхідно розмістити у місті Дніпро. Розроблена програма передбачає вибір цієї величини користувачем. На рис. 2 наведено графік, що відображує збіжність процесу налаштування штучної

імунної системи для пошуку розв'язку задачі комбінаторної оптимізації методом клонального відбору, робота якого залежить від таких параметрів алгоритму: розмір популяції, коефіцієнт клонування, коефіцієнт найгірших антитіл, кількість клонів [8].

За допомогою бібліотек shiny та leaflet отримані результати розрахунків були відображені на інтерактивній карті міста Дніпра. На рис. 3 наведено оптимальне розміщення 24 зарядних станцій. Крім того, на карті кожній розташованій зарядній станції поставлений у відповідність свій колір, і цим кольором позначені найближчі до нього існуючі майданчики. Отже, водночас із розташуванням зарядних станцій здійснене розбиття множини всіх функціонуючих майданчиків для паркування автотранспорту на підмножини, в межах яких найближча зарядна станція одна й та сама.

#### **Висновки**

Отже, в роботі розв'язана задача оптимального розміщення зарядних станцій для електромобілів в м. Дніпро у припущенні, що такими станціями вигідно обладнувати насамперед існуючі майданчики для паркування автомобілів. При цьому ставилася за мету мінімізація відстані від найвіддаленішого майданчика для паркування автотранспорту до найближчої зарядної станції. Кількість зарядних станцій, які розміщувалися, розрахована за допомогою методів теорії масового обслуговування. З урахуванням результатів аналізу ринку електромобілів як в цілому по Україні, так і в самому м. Дніпро, числа власників електричних автомобілів, технічних характеристик електромобілів і зарядок, а також параметрів роботи вже функціонуючих на території міста зарядних станцій виявлено, що для задоволення попиту майже 93% водіїв електромобілів достатньо розмістити на території міста 73 зарядних пістолети. У припущенні, що кожна станція має в середньому по 3 зарядні пістолети, серед функціонуючих автостоянок знайдено 24 тих, де найбільш раціонально (за територіальним критерієм) встановити зарядні пристрої. Оптимальне розміщення зарядних станцій на території міста, а також найближчі до кожної з них автомобільні стоянки представлені на карті міста Дніпра.

Надалі корисно при моделюванні задачі оптимального розміщення станцій враховувати рівномірне навантаження на всі станції, можливий прибуток і термін окупності вкладених інвестицій.

#### **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Панченко В.Г., Резнікова Н.В. Цілі сталого розвитку: Дніпро 2030. Регіональна доповідь. – Дніпро, 2018. – 153 с.
2. Xiang Liu, Ning Wang, Decun Dong. A Cost-Oriented Optimal Model of Electric Vehicle Taxi Systems // Sustainability. – 2018. – 10. – 1557. – P.23.
3. Yudai Honma, Shigeki Toriumi. Mathematical Analysis of Electric Vehicle Movement With Respect to Multiple Charging Stops // Journal of Energy Engineering. – 2017. – P.10.
4. Mujde Erol Genevois, Hatice Kocaman. Locating Electric Vehicle Charging Stations in Istanbul with AHP Based Mathematical Modelling // International Journal of Transportation Systems. – 2018. – P.10.
5. Csaba Farkas, Laszlo Prikler. Stochastic modelling of EV charging at charging stations // International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12) Santiago de Compostela (Spain). – 2012 – P.6.
6. Chu Yue Chen, Guowei Hua A New Model for Optimal Deployment of Electric Vehicle Charging and Battery Swapping Stations. // International Journal of Control and Automation. – 2014. – P.12.
7. Колоколов А.А., Леванова Т.В., Поздняков Ю.С. Алгоритмы искусственной иммунной системы для вариантной задачи размещения телекоммуникационных центров // Изв. Иркутского гос. Ун-та. Сер. Математика / ИГУ. – Иркутск, 2013. – Т.6. – Вып.1. – С.35-44.
8. Brownlee J. Clever Algorithms: Nature-Inspired Programming Recipes. First Edition. LuLu. January // Springer. – 2011. – P.265-276 p.

Надійшла до редакції 03.05.2019

#### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА И МЕСТ РАЗМЕЩЕНИЯ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ НА ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА**

**Коряшкіна Л.С., Беляев А.Р.**

*В работе рассматривается задача оптимального размещения зарядных станций для электромобилей в городе Днепр в предположении, что такими станциями необходимо оборудовать, в первую очередь, существующие места для парковки автотранспорта. Представлены результаты анализа рынка электромобилей как в целом по Украине, так и в самом городе Днепр. На основе информации о количестве владельцев электрических автомобилей, технических параметрах электромобилей и зарядок, а так же параметрах работы уже функционирующих на территории города зарядных станций, решается вначале вопрос о рациональном количестве зарядных станций, которые необходимо разместить для удовлетворения текущего спроса. Далее, с учетом транспортной инфраструктуры города, среди функционирующих автостоянок осуществляется поиск в нужном количестве тех, где наиболее рационально (по территориальному критерию) установить зарядные устройства. Целью оптимизации является минимизация расстояния от самой дальней площадки для парковки автотранспорта до ближайшей зарядной станции. Определение оптимального количества зарядных станций в городе Днепр, которые*

обеспечивают минимальные суммарные расходы от простоя постов и отказов на обслуживание, реализовано с помощью моделей и методов теории массового обслуживания. Проведен анализ таких параметров системы массового обслуживания, как поток заявок и возможная продуктивность каналов. Реализация системы массового обслуживания реализована на языке программирования C++ с использованием следующих исходных условий. Расчёт оптимального количества зарядных пистолетов на территории города осуществляется в предположении, что в стоимостном выражении доходы от эксплуатации одного зарядного пистолета и расходы на его содержание при вынужденном простое почти одни и те же. А коэффициент чистого дохода зарядной станции для электромобилей является пропорциональным разнице между средним количеством электромобилей, которые обслуживаются системой, и числом пистолетов, которые вынужденно простаивают. Для решения задачи комбинаторной оптимизации используется приближенный алгоритм искусственной иммунной системы.

**Ключевые слова:** электромобили, зарядные станции, оптимальное размещение, комбинаторная оптимизация, иммунные системы, геоинформационные технологии.

#### DETERMINATION OF OPTIMAL NUMBER AND PLACES OF LOCATION OF CHARGING STATION FOR ELECTRIC VEHICLES INSIDE THE CITY

*Koriashkina L.S., Belyaev A.R.*

**Dnipro Polytechnic, Dnipro, Ukraine**

*The article deals with the problem of optimal placement of charging stations for electric vehicles in Dnipro under the assumption that the existing sites for parking should be primarily equipped with such stations. Based on the results of electric vehicles market analysis, generally in Ukraine, as well as inside Dnipro city, of the number of electric car owners, technical parameters of electric vehicles and charging stations and also operation conditions of charging stations that already exist in the territory of the city, the issue about rational quantity of charging stations which need to be placed for satisfying current demand should be settled above all. After that, taking into consideration transport infrastructure of the city, the search of the estimated number of car parking lots among operational ones is carried out in order to find the ones where chargers are mostly rational to be installed (according to territorial criterion). Thus, the purpose of optimization is to minimize the distance from the most remote car parking lot to the nearest charging station. Determination of the optimal number of charging stations in Dnipro, which ensures minimal total losses from posts downtime and service denial, is carried out using models and methods of Queuing theory. The analysis of such parameters of the Queuing system as the flow of applications and the possible efficiency of channels was carried out. The implementation of the Queuing system is effected using C++ programming language with the following source data. The calculation of the optimal number of charging pistols in the city is based on the assumption that in terms of value, income from one charging pistol operation and expenses for its maintenance under forced downtime are almost the same and the coefficient of net income of charging station for electric vehicles is proportional to the difference between the average number of electric vehicles serviced by the system and the number of pistols forced to stand idle. To solve the combinatorial optimization issue, the approximate algorithm of the artificial immune system is used.*

**Keywords:** electric vehicles, charging stations, optimal placement, combinatorial optimization, immune systems, geoinformation technologies.

#### REFERENCES

1. Panchenko V.G., Reznikova N.V. *Cili stalogo rozvitku: Dnipro 2030. Regional'na dopovid'* [Sustainable Development Goals: Dnipro 2030. Regional Report]. Dnipro, 2018, 153 p. (in Ukrainian).
2. Xiang Liu, Ning Wang, Decun Dong. A Cost-Oriented Optimal Model of Electric Vehicle Taxi Systems. *Sustainability*, 2018, 10, 1557, 23 p., doi:10.3390/su10051557.
3. Yudai Honma, Shigeki Toriumi. Mathematical Analysis of Electric Vehicle Movement With Respect to Multiple Charging. *Journal of Energy Engineering Steps*, 2017, 10 p.
4. Mujde Erol Genevois, Hatice Kocaman. Locating Electric Vehicle Charging Stations in Istanbul with AHP Based Mathematical Modelling. *International Journal of Transportation Systems*, 2018, 10 p.
5. Ssaba Farkas, Laszlo Prikler. Stochastic modelling of EV charging at charging stations. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12) Santiago de Compostela (Spain)*, 2012, 6 p.
6. Chuyue Chen, Guowei Hua A New Model for Optimal Deployment of Electric Vehicle Charging and Battery Swapping Stations. *International Journal of Control and Automation*, 2014, 2 p.
7. Kolokolov A.A., Levanova T.V., Pozdnjakov Ju.S. *Algoritmy iskusstvennoj immunnnoj sistemy dlja variantnoj zadachi razmeshhenija telekommunikacionnyh centrov* [Artificial immune system algorithms for the multivariant problem of the telecommunications centers location]. *Izv. Irkutskogo gos. Un-ta. Ser. Matematika* [The bulletin of Irkutsk state university. Series «Mathematics»], IGU, Irkutsk, 2013, vyp.1, pp.35-44. (in Russian).
8. Brownlee J. *Clever Algorithms: Nature-Inspired Programming Recipes*. First Edition, LuLu, January 2011, pp.265-276.

UDC 681.586

*Manko G.I., Chistokletov E.P.***USE OF INFORMATION UNCERTAINTY IN IDENTIFICATION TASKS****Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine**

Informational methods for analyzing and managing systems under uncertainty are studied. The expediency of use of information uncertainty in tasks of identification of control objects and synthesis of regulatory systems is justified. For the numerical evaluation of information uncertainty, an amount of disinformation is used as Bongard's negative useful information. Such information uncertainty can serve as a criterion for the adequacy of a mathematical model of a control object. Information assessment of the modeling accuracy is applicable to any method of identification and allows a researcher to compare the accuracy of models that differ from each other by the method of obtaining (analytical or experimental), nature (deterministic or stochastic models), specific implementation (physical or mathematical models). In the course of parametric identification, an optimization problem of finding a minimum of information uncertainty in the parameter space of a mathematical model can be solved. The information uncertainty criterion provides verification of the statistical hypothesis about the adequacy of a particular model. If the criterion value exceeds a certain critical value, the adequacy hypothesis must be rejected. To calculate the critical values of the information adequacy criterion, a statistical experiment was performed. Using the Monte Carlo method, the probability distribution of the information criterion was investigated. A sufficiently smooth empirical criterion distribution function was constructed. The distribution of the information criterion has a pronounced asymmetry and a small positive kurtosis. It is revealed that this distribution is best approximated by the Generalized Extreme Value Distribution law. The critical value can be defined as a quantile of the level of 0.01 or 0.05 for this distribution.

**Keywords:** adequacy, computer modeling, distribution law, identification, information criterion, Monte Carlo method, control object, statistical hypothesis, uncertainty.

**DOI:** 10.32434/2521-6406-2019-5-1-30-35

***Statement of the problem***

As known, the synthesis of control systems begins with the process of obtaining a mathematical model of a controllable object. Meanwhile, developers are encountering the problem of incomplete correspondence of models with an identified object. Thus, during system synthesis, the models remain uncertain.

The sources of model uncertainty are:

- incomplete knowledge of the physical and chemical processes occurring in the object;
- assumptions and simplifications, taken during a model formation;
- noises, interferences and measurement errors taking place in experimental researches of objects;
- parameters changes in the object over time.

Another problem is the quality assessment of

the obtained model. To solve this problem, additional researches are carried out, listed in the report [1].

Verification is the process of determining that a model implementation accurately represents the developer's conceptual description of the model and its solution.

Validation is the process of determining the degree to which a model is an accurate representation of the real world from the perspective of the intended uses of a model.

Both verification and validation are processes that accumulate evidence of a model's correctness or accuracy for a specific scenario; thus, they cannot prove that a model is correct and accurate for all possible scenarios, but, rather, it can provide evidence that a model is sufficiently accurate for its intended use.



Adequacy is the decision that the model fidelity is sufficient for its intended use.

Fidelity is the difference between simulation and experimental outcomes.

#### **Analysis of recent research and publications**

Conceptual model validity, model verification, operational validity, and data validity were discussed by Robert G. Sargent [2]. Four different approaches to determining model validity are described, a graphical paradigm that relates verification and validation to the model development process is presented, and various validation techniques are defined.

In the article [3], the analytical expressions are obtained to determine the dynamic characteristics of controllable objects by the parameters of closed systems transient function. However, the automation of such process is extremely difficult.

In the work [4], the peculiarities of the controllable object identification by measures of Toolbox PID Tuner in the MATLAB environment are considered. There is stated that automatic identification does not always give satisfactory results.

A.N. Trunov [5] gives an overview of the works devoted to the general patterns of selection criteria search for settling the adequacy. There is an indication of a single expression of adequacy assessment absence, which makes possible taking into account several factors of influence and suggesting expressions for their calculation. It is proposed to use a criterion that is inversely proportional to the standard deviation of a model from experimental values.

The dispersion methods for adequacy assessment are widely known. E.P. Chernogorov [6] states that the system model allows a researcher to model some general population. The experiment provides a separate implementation of this general population. The model also provides an implementation of a general population, reproducing the experimental conditions. The adequacy assessment lies in checking statistical hypotheses about the belonging of these realizations to the same general population.

It should be noted that the dispersion criteria of the adequacy, like Fisher criterion [7], are applicable only in the case of a normal distribution of model variables, which doesn't always take place in practice.

#### **Objective**

The purpose of this work is to substantiate the criterion of information uncertainty application to assess the adequacy of models obtained in the course of identifying controllable objects.

#### **Informational uncertainty**

The philosophical category of "uncertainty" is in the focus of many scientists' attention. The authors of the article [8] consider uncertainty as a concept expressing a certain phenomenon associated with a subject-object relation. This makes it possible to distinguish four aspects of the study of the uncertainty concept. Uncertainty is a concept that can display: the properties of an object, the conditions of interaction between an object and a subject, the features of subjective perception, the features of interaction of new knowledge with current knowledge. So uncertainty is a category that reflects the absence of any (material or ideal) orderliness.

For control systems that are the subject of our research, in work [9], questions of quantitative estimation of orderliness and related concepts of complexity, organization, and entropy are considered. According to [9], ranking can be viewed as a characteristic of order – the absence of a difference in relation to something taken as the standard of order.

We consider a multidimensional parallelepiped in the parameter space of a system used in interval systems theory as such standard. We will consider such n-dimensional parallelepiped as a target area, a vector  $\bar{X}_{et}$ , directed from the origin of coordinates to the target area as a standard of order, and a system in such a state as ranked. The difference measure of the system parameters real vector  $\bar{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  from order standard  $\bar{X}_{et}$  characterizes the disorder  $\bar{Y}$ .

Uncertainty takes different meanings in different situations and at different times. If m situations are possible, the probabilities of which are  $p_1, p_2, \dots, p_m$ , then the ensemble gives a complete characteristic of disorder at each moment of time

$$\begin{pmatrix} \bar{Y}_1, \bar{Y}_2, \dots, \bar{Y}_m \\ p_1, p_2, \dots, p_m \end{pmatrix}. \quad (1)$$

A generalized ranking characteristic is the organization of the system, which, like ranking, is more convenient to estimate through the opposite value – disorder:

$$\bar{O} = \bigcup_{\alpha}^l \bigcup_{\beta}^d \bigcup_{\gamma}^m p_{\gamma} f(\bar{Y}), \quad (2)$$

where  $\bigcup$  is the symbol of generalization of the disorder characteristics, respectively, for m situations, d elements of a system and l time intervals; f is a function by which weighting of the disorder is

performed by the existence factor of its occurring in relation to a certain functioning of the system indicator;  $p_j$ ,  $s_i$ ,  $\alpha_\beta$  are the weights of  $j$ -th situation,  $i$ -th element and  $\beta$ -th time interval, respectively.

Taking formula (2) as a basis, we can derive a set of relations that can be used as an estimate of uncertainty. To simplify, let's take  $d=1$  and  $l=1$ . We perform the operation of generalization by  $m$  situations with weighting by probabilities included in the ensemble (1):

$$\bar{O} = \sum_{j=1}^m p_j \log \Pi_{\bar{y}_j}, \quad (3)$$

where  $\Pi_{\bar{y}_j}$  is some numerical characteristic of differences  $X$  from  $X_{et}$ , called the disorder parameter.

Taking a  $j$ -th situation disorder probability  $\Pi_{\bar{y}_j} = p_j$  as a parameter, we obtain Shannon's informational entropy formula:

$$\bar{O} = H = -\sum_j p_j \log p_j. \quad (4)$$

Mathematical model of a system under investigation due to inevitable inaccuracies gives distribution  $Q=\{q_j\}$  instead of real distribution  $P=\{p_j\}$ .

Taking  $\Pi_{\bar{y}_j} = q_j$ , we obtain Bongard's uncertainty formula [10]:

$$\bar{O} = N(p/q) = -\sum_j p_j \log q_j. \quad (5)$$

According to Bongard, useful information stored in the distribution  $Q=\{q_j\}$ , regarding the problem with a probability of response  $P=\{p_j\}$ , is:

$$I_n = H - N(p/q) = \sum_j p_j \log \frac{q_j}{p_j}. \quad (6)$$

Unlike the amount of information according to Shannon's classical theory, useful information can have both positive and negative meaning. Due to inaccuracies of a system's mathematical description, we should talk about the misinformation:

$$D = N(p/q) - H = \sum_j p_j \log \frac{p_j}{q_j}. \quad (7)$$

Thus, the uncertainty estimate brought by the model is disorganization according to formula (3), in which  $\Pi_{\bar{y}_j} = p_j/q_j$ . We will call the amount of misinformation (7) the information uncertainty.

Obviously, the largest value of misinformation occurs when  $H=0$ . Dividing the information uncertainty (7) by its maximum possible value, we obtain the relative information uncertainty:

$$\eta = \frac{D}{\sup D} = \frac{\sum_j p_j \log \frac{p_j}{q_j}}{-\sum_j p_j \log q_j} = 1 - \frac{\sum_j p_j \log p_j}{\sum_j p_j \log q_j}. \quad (8)$$

#### **Ways to use informational uncertainty in identification tasks**

Information uncertainty in the form (7) can be used as a criterion for the adequacy of mathematical models. Accurate assessment of modeling accuracy is possible with any method that makes it possible to compare models with different characteristics (analytical or experimental), character (deterministic or stochastic models), implementation of realizations (physical or mathematical models). A mathematical model cannot be defined as minimal uncertainty.

Relative information uncertainty in the form (8) can be used as a criterion for the adequacy of models obtained by other methods. Moreover, there is both the possibility of comparing several models and choosing the most adequate, taking the least amount of misinformation, as well as examining the adequacy of a particular model's statistical hypothesis.

Here is the way to determine whether the model is adequate. Let us assume that there is some object, a state of which is characterized by the variable  $y$  (output value of the object). As a result of experimental researches, which used the method of a passive experiment, for instance, a statistical sampling of the object's values was obtained. The estimate of probabilities  $p_j$  is a ratio of a sample's number of  $v_j$  implementations, falling within a  $j$ -th separation interval of a range of  $y$  value, to the sample size  $n$ .

Let there also be a mathematical model of such an object, for which model value of the output variable  $\hat{y}$  can be calculated, and by methods of information theory or mathematical statistics, a distribution  $Q=\{q_j\}$  can be found.

We hypothesize that a mathematical model is adequate to an object. To examine the hypothesis, we need to calculate a criterion of information uncertainty value for model in the form (7), for which

we use statistics

$$S = \frac{1}{n} \sum_j v_j \log \frac{v_j}{nq_j}. \quad (9)$$

The resulting criterion value is compared with its critical value. If the calculated value is greater than critical, the adequacy hypothesis is rejected.

To calculate critical values, it is necessary to know the adequacy criterion distribution law. The distribution law can be determined by the statistical computer simulation method, described in [11].

The calculating power of modern computers allows us to solve many problems using a statistical experiment. Regulatory document P 50.1.037–2002 [12] recommends: if the probability distribution law is used to describe the sample  $F(x, \theta)$  and estimates of its parameters are found, and to test a complex hypothesis  $H_0: F(x) \in \{F(x, \theta), \theta \in Q\}$  a researcher doesn't know the statistical distribution of the corresponding criterion, it is rational to use the methodology of statistical laws computer analysis, which is well proven in modeling distributions of criteria statistics.

To do so, by the law  $F(x, \theta)$  there should be modeled  $N$  statistical samples of the same volume  $n$  as a sample, for which an examination of the hypothesis  $H_0: F(x) \in \{F(x, \theta), \theta \in Q\}$  is needed. Next, for each of the  $N$  samples, it is necessary to calculate the same parameters of the law estimates, and then  $S$  statistics of the studied criterion value. As a result, statistics values sampling  $S_1, S_2, \dots, S_N$  will be obtained with the distribution law  $G(Sn^{1/2}H_0)$  for examined hypothesis  $H_0$ . For this sample, with a sufficiently large  $N$ , a quite smooth empirical distribution function of  $G_N(Sn^{1/2}H_0)$  can be built, which can be directly used to conclude whether the hypothesis  $H_0$  can be accepted. Simulated distribution deviations from the theoretical one at  $N=2000$  usually have an order of  $H \approx \pm 0.015$ . If necessary, it is possible to build an approximate analytical model, approximating  $G_N(Sn^{1/2}H_0)$ , and to make afterward a decision about the examined hypothesis, based on this model.

The information criterion of the probability distribution values research was carried out by the Monte Carlo method. A sample of random  $v_j$  values was generated, for which the value of the  $S$  statistics was determined, and this was repeated 3000 times. This is a number greater than  $N=2000$ , recommended in [12]. For a sample of criterion values obtained this way, the distribution of criterion values histogram was built. The critical value was defined as 0.01-

quantile.

The information criterion distribution has a pronounced asymmetry and a small positive kurtosis. Lognormal Distribution, Gamma Distribution, Weibull Distribution, Generalized Extreme Value Distribution can give such a picture. Compliance with all these distributions was verified using the information criterion. The calculation results showed that the Generalized Extreme Value Distribution provides the best approximation. However, as shown by additional researches, in the small values of information uncertainty criterion region, these distributions density curves differ from the normal distribution curve a little bit, and the quantile level of 0.05 for these distributions is almost equal. This gives grounds to state that at a trust level of 90%, it is permissible to use value tables of the normal distribution function to determine the critical values of the information adequacy criterion.

### Conclusions

The use of the informative uncertainty criteria in the tasks of identification has been proposed in this paper. As a criterion for informational uncertainty, it was proposed to use the amount of misinformation brought by the mathematical model. The formulas for calculating such a criterion were given. The ways of using the criterion in the course of solving identification problems are shown.

### REFERENCES

1. *Concepts of Model Verification and Validation* / Thacker B.H., Doebbling S.W., Hemez F.M. et al. – Los Alamos: LANL, 2004. – 41 p.
2. *Sargent R.G. Verification and validation of simulation models* // WSC: Proceedings of the Winter Simulation Conference. – Syracuse, NY 13244, U.S.A. – 2011. – P.183-198.
3. *Стрижнев А.Г., Марков А.В., Русакович А.Н. Идентификация объекта управления по переходной характеристике замкнутой системы* // Доклады БГУИР. – 2012. – № 5(67). – С.65-72.
4. *Бильфельд Н.В. Идентификация объектов управления в Toolbox PID Tuner* // Новый университет. Серия: Технические науки. – 2016. – № 6-7. – С.52-53.
5. *Трунов О.М. Критерій адекватності як оцінка ефективності процесу побудови моделі* // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 1/4(73). – С.36-41.
6. *Черногорев Е.П. Некоторые вопросы оценки адекватности модели* // Наука ЮУрГУ: материалы 66-й научн. конф. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2014. – С.162-168.

7. Fang X., Wang L. Feature selection based on fisher criterion and sequential forward selection for intrusion detection // Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V. – 2017. – Vol.32. – No 1. – P.498-503.

8. Дорожкин А.М., Соколова О.И. Понятие «неопределенность» в современной науке и философии // Вестник Вятского государственного гуманитарного университета. – 2015. – С.5-12.

9. Электрические системы. Кибернетика электрических систем : учеб. пос. для электроэнерг. вузов / Под ред. В.А. Веникова. – М.: Высш. школа, 1974. – 328 с.

10. Бонгард М.М. Проблемы узнавания. – М.: Наука, 1967. – 320 с.

11. Манко Г.И., Довгополая А.А. Об использовании информационного критерия проверки гипотез о законе распределения ошибок измерения // Вопросы химии и химической технологии. – 2013. – № 1. – С.181-184.

12. P 50.1.037-2002. Рекомендации по стандартизации. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим: методические рекомендации. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 153 с.

Received 20.05.2019

## ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ В ЗАДАЧАХ ІДЕНТИФІКАЦІЇ

Манко Г.І., Чистоклетов С.П.

Вивчаються інформаційні методи аналізу та управління системами в умовах невизначеності. Обґрунтовано доцільність використання інформаційної невизначеності в задачах ідентифікації об'єктів управління і синтезу систем регулювання. Для числового оцінювання інформаційної невизначеності використовується кількість дезінформації як негативною корисною інформації Бонгарда. Така інформаційна невизначеність може слугувати як критерій адекватності математичної моделі об'єкта управління. Інформаційна оцінювання точності моделювання може бути застосована при будь-якому методі ідентифікації і дозволяє порівнювати точність моделей, що відрізняються одна від одної методом отримання (аналітичним або експериментальним), характером (детерміновані або стохастичні моделі), конкретною реалізацією (фізичні або математичні моделі). В ході параметричної ідентифікації може вирішуватися оптимізаційна задача пошуку мінімуму інформаційної невизначеності в просторі параметрів математичної моделі. Критерій інформаційної невизначеності забезпечує перевірку статистичної гіпотези про адекватність конкретної моделі. Якщо значення критерію перевищує деяке критичне значення, гіпотеза про адекватність повинна бути відкинута. Для розрахунку критичних значень інформаційного критерію адекватності був здійснений статистичний експеримент. З використанням методу Монте-Карло було досліджено розподіл ймовірностей інформаційного критерію. Була побудована достатньо гладка емпірична функція розподілу критерію. Розподіл інформаційного критерію має виражену асиметрію і невеликий позитивний ексцес. Виявлено, що цей розподіл найкращим чином апроксимується законом Generalized Extreme Value Distribution. Критичне значення може бути визначено як квантиль рівня 0,01 або 0,05 цього розподілу.

**Ключові слова:** адекватність, комп'ютерне моделювання, закон розподілу, ідентифікація, інформаційний критерій, метод Монте-Карло,

контрольований об'єкт, статистична гіпотеза, невизначеність.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ЗАДАЧАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Манко Г.И., Чистоклетов Е.П.

Изучаются информационные методы анализа и управления системами в условиях неопределенности. Обоснована целесообразность использования информационной неопределенности в задачах идентификации объектов управления и синтеза систем регулирования. Для числовой оценки информационной неопределенности используется количество дезинформации как отрицательной полезной информации Бонгарда. Такая информационная неопределенность может служить в качестве критерия адекватности математической модели объекта управления. Информационная оценка точности моделирования применима при любом методе идентификации и позволяет сравнивать точность моделей, отличающихся друг от друга методом получения (аналитическим или экспериментальным), характером (детерминированные или стохастические модели), конкретной реализацией (физические или математические модели). В ходе параметрической идентификации может решаться оптимизационная задача поиска минимума информационной неопределенности в пространстве параметров математической модели. Критерий информационной неопределенности обеспечивает проверку статистической гипотезы об адекватности конкретной модели. Если значение критерия превышает некоторое критическое значение, гипотеза об адекватности должна быть отвергнута. Для расчета критических значений информационного критерия адекватности был проведен статистический эксперимент. С использованием метода Монте-Карло было исследовано распределение вероятностей информационного критерия. Была построена достаточно гладкая эмпирическая функция распределения критерия. Распределение информационного критерия имеет выраженную асимметрию и небольшой положительный эксцес. Выведено, что это распределение наилучшим образом аппроксимируется законом Generalized Extreme Value Distribution. Критическое значение может быть определено как квантиль уровня 0,01 или 0,05 этого распределения.

**Ключевые слова:** адекватность, компьютерное моделирование, закон распределения, идентификация, информационный критерий, метод Монте-Карло, контролируемый объект, статистическая гипотеза, неопределенность.

## USE OF INFORMATION UNCERTAINTY IN IDENTIFICATION TASKS

Manko G.I., Chistokletov E.P.

Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

*Informational methods for analyzing and managing systems under uncertainty are studied. The expediency of use of information uncertainty in tasks of identification of control objects and synthesis of regulatory systems is justified. For the numerical evaluation of information uncertainty, an amount of disinformation is used as Bongard's negative useful information. Such information uncertainty can serve as a criterion for the adequacy of a mathematical model of a control object. Information assessment of the modeling accuracy is applicable to any method of identification and allows a researcher to compare the accuracy of models that differ from each other by the method of obtaining (analytical or experimental), nature (deterministic or stochastic models), specific implementation (physical or mathematical models). In the course of parametric identification, an optimization problem of finding a minimum of information uncertainty in the parameter space of a mathematical model can be solved. The information uncertainty criterion provides verification of the statistical hypothesis about the adequacy of a particular model. If the criterion value exceeds a certain critical value, the adequacy hypothesis must be rejected. To calculate the critical values of the information adequacy criterion, a statistical experiment was performed. Using the Monte Carlo method, the probability distribution of the information criterion was investigated. A sufficiently smooth empirical criterion distribution function was constructed. The distribution of the information criterion has a pronounced asymmetry and a small positive kurtosis. It is revealed that this distribution is best approximated by the Generalized Extreme Value Distribution law. The critical value can be defined as a quantile of the level of 0.01 or 0.05 for this distribution.*

**Keywords:** adequacy, computer modeling, distribution law, identification, information criterion, Monte Carlo method, control object, statistical hypothesis, uncertainty.

### REFERENCES

1. Thacker B.H., Doebbling S.W., Hemez F.M. Concepts of Model Verification and Validation. Los Alamos: Los Alamos National Lab., 2004. 41 p.
2. Sargent R.G. Verification and validation of simulation models. WSC: Proceedings of the Winter Simulation Conference. Syracuse, NY 13244, U.S.A., 2011, pp. 183-198.
3. Strizhnev A.G., Markov A.V., Rusakovich A.N. *Identifikaciya ob#ekta upravleniya po perekhodnoj harakteristike zamknutoj sistemy* [Control object identification by a closed system transition characteristic]. *Doklady BGUIR* [Reports of BSUIRE], 2012, no. 5(67), pp. 65-72. (in Russian).
4. Bil'fel'd N.V. *Identifikaciya ob#ektov upravleniya v Toolbox PID Tuner* [Identification of control objects in Toolbox PID Tuner]. *Novyj universitet: serija «Tekhnicheskie nauki»* [New University: «Technical Engineering» series], 2016, no. 6-7. pp. 52-53. (in Russian).
5. Trunov O.M. *Kriterij adekvatnosti yak ocinka efektyvnosti procesu pobudovi modeli* [The adequacy criteria as the process of model building efficiency assessment]. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tekhnologij* [East European Journal of Advanced Technologies], 2015, no. 1/4(73). pp. 36-41. (in Ukrainian).
6. Chernogorov E.P. *Nekotorye voprosy ocenki adekvatnosti modeli* [Some questions of the model adequacy assessment]. *Nauka YUUrGU: materialy 66-j nauchnaja konferencija* [Science of SUSU: materials of the 66th scientific conference]. Chelyabinsk: publishing center YUUrGU, 2014, pp. 162-168. (in Russian).
7. Fang X., Wang L. Feature selection based on fisher criterion and sequential forward selection for intrusion detection. *Revista de la Facultad de Ingenieria U.C.V.*, 2017, vol. 32, no. 1, pp. 498-503.
8. Dorozhkin A.M., Sokolova O.I. *Ponjatie «neopredelenost'» v sovremennoj nauke i filosofii* [The concept of «uncertainty» in modern science and philosophy]. *Vestnik Vjatskogo gosudarstvennogo gumanitarnogo universiteta* [Bulletin of the Vyatka State Humanitarian University], 2015, pp 5-12. (in Russian).
9. Venikova V.A. *Elektricheskie sistemy* [Electrical systems]. *Kibernetika elektricheskikh sistem: ucheb. pos. dlya elektroenerg. vuzov* [Cybernetics of electrical systems: stud guide for electrical energy universities]. Moscow, 1974, 328 p. (in Russian).
10. Bongard M.M. *Problemy uznnavaniya* [Problems of Recognition]. Moscow: Science, 1967, 320 p. (in Russian).
11. Manko G.I., Dovgopolaya A.A. *Ob ispol'zovanii informacionnogo kriteriya proverki gipotez o zakone raspredeleniya oshibok izmereniy* [About using the information criteria for testing the hypotheses of measurement error distribution law]. *Questions of chemistry and chemical technology*, 2013, no. 1, pp. 181-184. (in Russian).
12. R 50.1.037-2002. *Rekomendacii po standartizacii* [Recommendations for standardization]. *Pravila proverki soglasiya opyt'nogo raspredeleniya s teoreticheskim: metodicheskie rekomendacii* [Rules for checking the accordance of an experimental and theoretical distribution: methodological guidelines] Novosibirsk: NGTU publ., 2002, 153 p. (in Russian).

UDC 519.67:681.332

*Nikonenko A.N., Korotka L.I.***RECOGNITION AND GENERATION OF QR/BAR CODES IN MOBILE APPLICATIONS****Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine**

The article is devoted to the analysis of methods of recognition and generation of QR/bar codes in mobile applications. The most common algorithms for detecting and generating codes are considered: Otsu method, Reed-Solomon codes, binary coding algorithm, Orazio Gallo and Roberto Manduchi approach. In this article, it is proposed to use an algorithm based on these approaches, which is refined and used for the software implementation of the mobile application. The main stages of the recognition process in the work are: converting a color image into gray shades (using the pixel hue difference method); gray image binarization (Otsu algorithm); using affine transformations to preserve parallelism, which includes rotation, stretching, shifting, scaling. The main stages of the generating process for QR codes are: processing and reduction to the standard form for QR codes; the process of generating a binary string (in the work data of only numerical and symbolic types was considered); counting the total number of characters in the source string and converting the decimal number to a binary representation; determining the length of the generated binary string according to the Denso Wave standard (the encoding of character types is different); determining the required length of the final binary string; auxiliary tokens are concatenated; generation of Reed-Solomon error correction codes. Three types of bar codes are considered: code 128, code 39, and EAN 13. The last type was used. A bar code scanner includes two steps for automatically scanning all bar codes: finding the location of the bar code, bar code decoding. To localize the image and the bar code that is captured by the system, the algorithm of Orazio Gallo and Roberto Manduchi is used. In order to obtain a smoothed map, a block filter of a certain size was used, taking into account the size of the input code image. In addition to the code localization, it is cut off: the intensity of each pixel is taken into account, and the lines of the bar code (pixels with an intensity greater than zero) are highlighted. An image with improved contrast is converted to binary form, and to convert to an ideal image, each image column is scanned and checked for the maximum number of pixels with an intensity of zero or one. This article focuses on describing the edge detection process. The decoding algorithm uses an array of code width bands. All the above approaches and algorithms based on them are implemented as a mobile application for recognition and generation of codes.

**Keywords:** recognition, generation, binarization, affine transformations, bar code.

**DOI:** 10.32434/2521-6406-2019-5-1-36-42

***Formulation of a problem***

A sufficient amount of works has been devoted to recognition of texts [1], labels and barcodes. The use of QR codes (Quick Response code) in everyday life opens up new opportunities: to establish a connection between hyperspace and real life, using modern technologies for transmitting digital data streams and methods of indirect information transfer. QR codes are often used for commercial tracking, travel tickets, storage of personal information, etc.

As is well known, bar codes are read with scanners that use laser beams. Currently, smartphones can also be used as scanning devices for QR codes. This is a very simple, easy and convenient way to access specific URLs or websites. The fact that there is no need to manually enter the URL provides a better conversion, and therefore it is good for marketing purposes and more.

Quite contradictory requirements are put forward for QR codes: the code must store a huge

amount of necessary information, however, at the same time occupy a small area. In addition, if the information is damaged, then it should be easily restored. In this case, the code must have a high recognition rate, despite the fact that some of it may be missing. Obviously, it is quite convenient and practical to scan information using mobile phones where a recognition program is installed. Obviously, the development of free mobile applications for recognition and generation of codes is relevant.

#### ***Analysis of recent research and publications***

It should be noted that, despite the practical application of codes and the relevance of their use, there are not so many works on their detection and generation. As you know, the concept of a QR code first appeared in Japan in 1994: a code standard was developed and presented to track the different stages of Toyota production at its enterprises. Due to simplicity, the popularity of QR codes has increased, which made it possible to use these two-dimensional codes in all spheres of human life [2]. The most common is the algorithm proposed by Otsu, calculating the binarization threshold for a halftone image, which is used in the field of computer pattern recognition and image processing to produce black and white images [3].

One approach to decoding bar codes was proposed by Orazio Gallo and Roberto Manduchi. The method is based on deformable patterns and uses all the information about the gray level of each pixel. They presented a new bar code decoding algorithm (localization and reading) that can work with blurred, noisy images and low-resolution images [4].

In the general case, when generating noise-proof codes (Reed-Solomon), multiplication and division of polynomials into each other is used [5]. The algorithm proposed by Luping Fang and Chao Xie can detect a bar code area even against a complex background using image analysis based on areas. Unlike traditional image analysis based on regions, the algorithm is processed using an integral image. It can work with images that are blurred, contain obliquely arranged barcode areas and are shot under different lighting conditions. The fast and reliable way to detect a noisy barcode is offered by Xianyong Fang [6–8].

#### ***Formulation of the objectives of the article (problem statement)***

The paper discusses the methods of recognition and generation of QR / bar codes that are available in the public domain and analyzes them. An aim of the work is to develop an algorithm for generating and detecting codes, on the basis of which a mobile

application is created. In this case, special attention is paid to the performance of the developed algorithm.

#### ***Presentation of the main research material***

As is known, the use of two-dimensional bar codes is that the printed code is transmitted to the object, then read using a mobile device that has a functioning camera and installed necessary software that will decode the bar code itself.

The QR code detection algorithm presented in this work consists of several stages: searching for outlines in the image; contour approximations; search for suitable quadrangles; FP block ratio checker (Finder Pattern).

There are not many programs that read and decode QR codes, they are all implemented using a simple code detection algorithm on the image obtained from the camera, after which a simple procedure for information decoding takes place. And all this requires a completely clear positioning of the selected area on the device and a special arrangement of QR codes, the area must exactly coincide with sides of QR codes. That is, the user needs to independently focus on a necessary QR code and control that the area for QR code scanning coincides with the decoded QR code itself.

Let us dwell on the important points of this process. First of all, you need to convert a color image into an image with gray shades. A method based on the difference in the illumination of pixels is used. It is a modifiable analogue of the method of averaging values of the three components of each pixel [2]. Calculated by the formula:  $P[i][j]=(R+G+B)/3$ .

For this work, the selected coefficients of color components are:  $P_{new}=0.21 \cdot R+0.71 \cdot G+0.07 \cdot B$ .

The result will be the calculation of all pixels in the image by the formula, after which a new image only in shades of gray is obtained.

For binarization of the image, the Otsu method is used, where the image forms a bimodal histogram. Next, the optimal threshold is computed, which divides the two classes so that their intragroup dispersion tends to the minimum value. The method is described in a way below [3].

Let  $q_1$  and  $q_2$  be the probabilities of each class, which were calculated using the formulas:

$$q_1(t) = \sum_{i=1}^t P(x);$$

$$q_2(t) = \sum_{i=t+1}^I P(x).$$

Dispersion for each of the classes is determined as follows:

$$\sigma_1^2(t) = \sum_{i=1}^t [i - \mu_1(t)]^2 \frac{P(i)}{q_1(t)};$$

$$\sigma_2^2(t) = \sum_{i=t+1}^I [i - \mu_2(t)]^2 \frac{P(i)}{q_2(t)}.$$

The mean value of each class is calculated:

$$\mu_1(t) = \sum_{i=1}^t \frac{iP(i)}{q_1(t)};$$

$$\mu_2(t) = \sum_{i=t+1}^I \frac{iP(i)}{q_2(t)}.$$

In order to get a result you need to maximize the following equation:

$$\begin{aligned} \sigma_b^2 &= \sigma^2 - \sigma_w^2(t) = \\ &= q_1(t)[1 - q_1(t)][\mu_1(t) - \mu_2(t)]^2. \end{aligned}$$

As a result, the required threshold was obtained, by which it is possible to divide the histogram into two classes and to assign the pixels of the smaller class to zeros, and to the pixels of the other class to ones. Thus, the binarized image is obtained and proceed to the next stage.

As is known, affine transformations retain parallelism. The full group of affine transformations consists of four transformations:

- turn;
- stretching;
- shift;
- scaling.

Transformations of this group can be written in different ways, for example, [4].

The process of coding QR codes is divided into several main stages. The process, which is implemented in this work, is described below.

The first stage is that a string with input data is processed and reduced to the standard form for QR codes.

After the string with the initial data is received, the process of generating a binary string begins. Four technical bits are added to the beginning of the binary string X, which are determined based on the data type being encoded. The list of possible combinations

includes: 0001 – numeric data, 0010 – alphanumeric data, 0100 – binary information, 1000 – special Japanese characters. In order to simplify the process of displaying the results, only numerical and symbolic data were considered in the paper.

In the next generation step, the total number of characters in the source string is calculated and the decimal number is converted to a binary representation. It is necessary to determine a length of the generated binary string according to the Denso Wave standard.

In order to encode a character data type, the source string must be broken into pairs of characters. Then you need to know the value from the ASCII table for the first character in each of the pairs, this value is multiplied by the number 45, then the value is taken according to the same ASCII table for the second character in each of the pairs. These two values are summed, and each pair of symbols has its own numerical value. The resulting numbers must be sequentially represented as 11-bit numbers in binary form. If the line contains an odd number of characters, then the value for this character from ASCII is taken and converted to a 6-bit binary number. All received blocks are also concatenated with the generated string X on the right side.

After completing the described steps, it is necessary to refer to the version table of Denso Wave again, and to determine the required length of the final binary string. If the length of the string X is less than required, then from the right side from 1 to 4 bits are added (depending on how many characters are missing). The generated string X is divided into 8-bit tokens (blocks) and, if the last block is less than 8 bits, then zeros are appended to it on the right side.

At the final stage of generating a binary string, auxiliary tokens are concatenated with string X. In case the generated string is smaller than required (according to the version table), eight bit blocks are added to the end of the generated string in turn, until the required number of bits is reached: 11101100 and 00010001. When the generated string contains the required number of bits, the binary string is considered to be finally generated and can be used in the next steps of generating QR codes.

Next, go to the generation of Reed-Solomon codes for error correction. As noted earlier, in general case, when generating Reed-Solomon codes, the multiplication and division of polynomials are used. For example, if polynomial A is a code word (generated on the basis of the binary string obtained in the previous step), and B is an irreducible polynomial that is known to both sides exchanging



information, then their multiplication will generate a new polynomial C.

This process means that when the transmitted message is received, the process of decoding it will be to divide the polynomials by each other. If the division of a polynomial C by a polynomial B leaves a remainder, then a transmitted message contains an error. The remainder of the division forms a polynomial syndrome, through which you can find out the damaged bits. In addition, in some cases, you can correct a certain number of errors in the received message. If the degree of polynomial B differs from the degree of polynomial A by at least two, then it is possible not only to determine the presence or absence of an error in the transmitted message, but also to correct some of them. In this case, the following equation (where k is the degree of the polynomial; t is the maximum value of possible corrections) shows that the redundancy of Reed-Solomon codes is:  $k=2 \cdot t$ .

The process of generating Reed-Solomon codes, their encoding and decoding, is described in the appendix of the QR codes specification [5]. As a result of generating a string using Reed-Solomon codes for the original message, a set of decimal values will be generated. They need to be converted to binary format and concatenated with the source line on the right side. The result of all the previous steps will be a string in binary format containing the original message data plus Reed-Solomon codes in order to provide the possibility of error correction in the decoded message. Using Reed-Solomon codes, code words are generated in order to recover errors when reading information from a QR code. Then they are combined with the original message, which was generated at the first stage of the algorithm. The result will be one line containing a certain number of bits according to the specification. At this stage, the QR code has not yet been formed. Next, we analyze how the two-dimensional representation of a QR code is generated. To begin with, a standard QR code pattern is generated, which contain all the necessary technical bits needed to define auxiliary information. Such standard template is the basis of any QR code. This template always includes three positioning markers located in an upper left and right corner, as well as in a lower left corner of a template. In addition, all the templates contain special Timing Patterns (alternating white and black pixels), which serve to pre-determine the version of the QR code.

With a known version of the QR code and a level of error correction, and in the presence of all the technical primitives in the template, the filling of the template of the QR code with previously

generated information begins. The process of adding bits of the original message to the matrix is as follows: first, the first pixel (a color is selected according to the value of the bit) is located in the lower right-most corner of the template. The second pixel is added to the left of the first on the same line. The next pair of bits is located on top, similar to the first two. This is how the entire template column is filled. When the filled column has reached the top of the template, the process begins anew, but from the first free cell located on the top-right (the same process, but only from the bottom upwards), as well as the first column. Thus, the entire QR code template is filled. The received QR code is not fully completed at this stage. In order to complete the code generation process, it is necessary to apply special masks and calculate penalty values from the received QR codes. According to the specification, it is necessary to generate eight different types of QR codes based on the newly generated one. Each of these eight codes is defined by its formula, presented in the table.

Each of the formulas presented is used to determine whether a pixel located with certain indices should be replaced with the opposite value.

A bar code is a visual display of information in the form of stripes and gaps on the surface. Stripes and spaces can be of different widths and consist of numbers, symbols. Today, different types of bar codes are used (code 128, code 39 and EAN 13) [6–8]. In this case, EAN 13 is used.

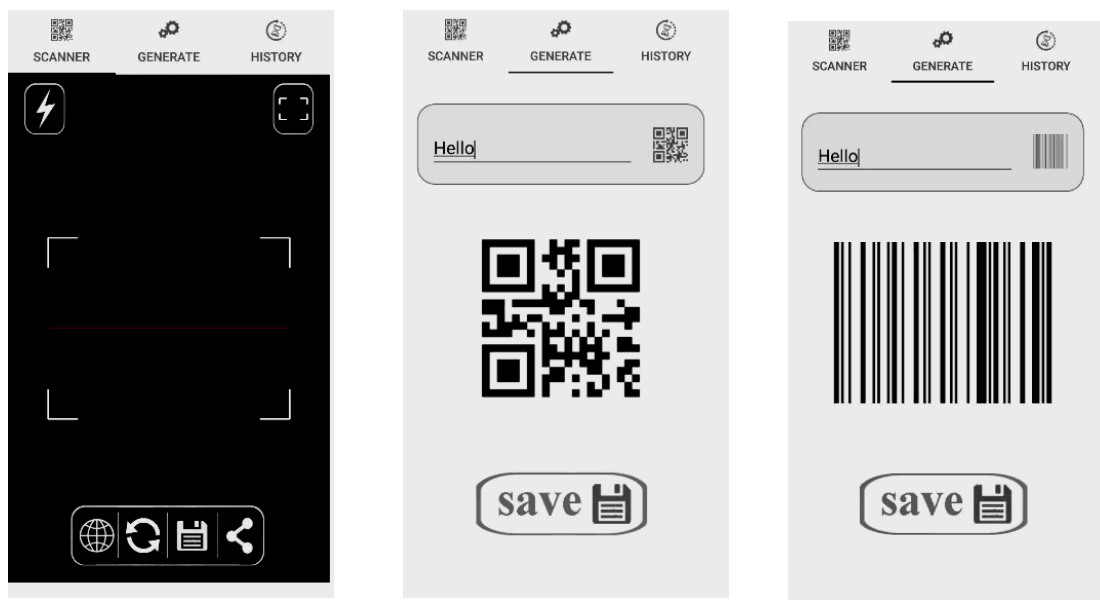
**Formulas for generating eight codes**

Mask Pattern	Condition
0	$(i+j) \bmod 2=0$
1	$i \bmod 2=0$
2	$j \bmod 3=0$
3	$(i + j) \bmod 3=0$
4	$((i \text{ div } 2)+(j \text{ div } 3)) \bmod 2=0$
5	$(i \text{ j}) \bmod 2+(i \text{ j}) \bmod 3=0$
6	$((i \text{ j}) \bmod 2+(i \text{ j}) \bmod 3) \bmod 2=0$
7	$((i \text{ j}) \bmod 3+(i+j) \bmod 2) \bmod 2=0$

Here i is the row index, j is the column index. The BAR code scanner includes several bar code scanning steps:

- finding the location of the bar code;
- bar code decoding.

The numbers are divided into three groups, that is, they form three different sets of numbers. The first group is encoded using a scheme, where each digit has two possible codings: one with even parity and the other with odd parity. The first digit is



Windows of the mobile application «Recognition and generation of QR/bar codes»

encoded with the choice of pattern. Each digit in the last group of six digits is encoded using one set of column patterns that are used for the Universal Product Code (UPC). When the first digit is zero, then the digits in the first group of six are encoded using patterns that are used for the UPC; because of this, the UPC bar code is treated as an EAN-13 bar code with the first digit shown as zero [6].

In this paper, the algorithm by Roberto Manduchi and Orazio Gallo was chosen, which states that the bar code image is captured by the camera in such way that the vertical axis is parallel to the stripes. Also, this image is transformed into an image in a gray tint [7]. It is necessary to calculate the horizontal and vertical derivatives  $I_x(n)$  and  $I_y(n)$  for each pixel  $n$ , then they are combined in a non-linear way, which is calculated by the formula:  $I_e(n) = |I_x(n) - |I_y(n)|$ .

It is possible to suggest that the majority of points in the bar code must have a large  $I_e(n)$  value. To achieve it, a block filter of size  $31 \times 31$  is used over  $I_e(n)$ , and a smoothed map  $I_s(n)$  is obtained.

The filter size is selected from the size of the incoming bar code image and the smallest bar code size. As a result, the binary form  $I_s(n)$  is presented with a threshold, which is calculated using the simple Otsu method, and the output image. Next, the pixel  $N_0$  is selected, which tends to the maximum  $I_s(n)$ . The vertical and horizontal line extends from  $N_0$  and a rectangle is formulated, which has sides parallel to the axes of the bar code image.

As is well known, when a bar code is scanned, unnecessary information that surrounds it enters the camera. Therefore, when the process of localization

of the bar code passes, the information surrounding it will be deleted (the pixels are zero). The image is then cropped: the lines of the bar code are highlighted (the pixels are greater than zero).

Since an image can be distorted in real time, it needs to be converted to perfect. To do this, you need to check each column for the maximum number of pixels with an intensity of zero or one. If a column has more pixels with one, then the column needs to be converted to pixels with intensity of one. In order to detect edges, you need to create an array of edges that forms the edges of the bar code image strips. The bandwidth is calculated by subtracting the successive elements of the array of edges (the bandwidth is the input to the decoding).

Decoding occurs in such a way that the bar code number is decoded using an array of width bands. The first digit does not change (because the first digit is the country code, it will not change). The first group, which includes six digits, is encoded as LGLGGL, and the remaining group, which also consists of six digits, is encoded as RRRRRR (the black and white columns alternate where white is zero and black is one) [7].

All of the above is implemented as a mobile application, some of the results of its use are shown in the figure.

#### **Results and conclusions**

The article describes an approach to developing a mobile application for recognizing and decoding QR/bar codes.

As a result, the following tasks were solved:  
– algorithms for the transformation of

geometric objects on the plane, coding and decoding of QR/ bar codes, recognition and image processing were studied;

– algorithms for the selection of QR/bar code in the image;

– algorithms necessary for converting QR codes to standard form using affine transformations are presented;

– implemented QR/bar code decoding algorithm;

– developed a mobile application based on the described algorithm.

## REFERENCES

1. Korotka L.I., Nikonenko A.N. Mathematical methods for processing multidimensional data // MATERIALS III-rd International scientific-technical conference COMPUTER MODELING AND OPTIMIZATION OF COMPLEX SYSTEMS (Dnipro, 1-3 November 2017). – Dnipro: USUCT, 2017. – P.116-117.

2. ISO/IEC 18004:2015 Information – Automatic identification and data capture techniques – QR Code BARcode symbology specification. Available at: <https://www.iso.org/standard/62021.html>

3. ISO/IEC 18004:2000 Information technology – Automatic identification and data capture techniques – BAR code symbology [Электронный ресурс] – QR code. Available at: <https://www.iso.org/standard/30789.html>

4. Otsu N.A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms // IEEE Trans. Sys. Man., Cyber. – 1979.– Vol.9. – Issue 1. – P.62-66.

5. David F. Rogers, J. Alan Adams. Mathematical elements for computer graphics // Second Edition. McGraw Hill Education. – 2012. – 611 p.

6. University. EE387 Notes #7, 2014. – [Электронный ресурс] P.24-86. Available at: <https://web.archive.org/web/20140630172526/http://web.stanford.edu/class/ee387/handouts/notes7>.

7. Chai D, Hock F. “Locating and Decoding EAN-13 BARcodes from Images Captured by Digital Cameras”, Information, Communications and Signal Processing. – Fifth International Conference. – 2005. – P.1595-1599.

8. Gallo O., Manduchi R. “Reading 1D Bar-codes with Mobile Phones Using Deformable Templates”, Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions. – 2011. – Vol.33. – № 9. – P.1834-1843.

Received 08.05.2019

## РОЗПІЗНАВАННЯ ТА ГЕНЕРАЦІЯ QR/BAR-КОДІВ У МОБІЛЬНИХ ДОДАТКАХ

Никоненко О.М., Коротка Л.І.

Стаття присвячена аналізу методів розпізнавання та генерації QR/bar кодів в мобільних додатках. Розглянуто найбільш поширені алгоритми детектування і кодування кодів: метод Оцу, коди Ріда-Соломона, алгоритм двійкового кодування, підхід Ораціо Галло і Роберто Мандучі. У роботі пропонується використовувати алгоритм, який базується на зазначених підходах, та, який доопрацьовано і використано для програмної реалізації мобільного додатку. Основними етапами процесу розпізнавання в роботі є: конвертація кольорового зображення у відтінки сірого (використовується метод різниці відтінків пікселів); бінаризація сірого зображення (алгоритм Оцу); використання афінних перетворень для збереження паралельності, які включають поворот, розтягнення, зрушення, масштабування. Основними етапами процесу генерації QR-кодів є: обробка і приведення до стандартного для QR кодів виду; процес генерації бінарних рядків (в роботі розглядалися дані тільки чисельного і символічного типів); підрахунок загальної кількості символів у заданому рядку і перетворення десятичного числа в бінарне надання; визначення довжини бінарного рядка, що генерується, відповідно до стандарту компанії Denso Wave (кодування символічних типів здійснюється інакше); визначення необхідної довжини кінцевого бінарного рядка; доповніжні токени конкатенуються; генерація кодів Ріда-Соломона для корекції помилок. В роботі розглянуті три типи штрих-кодів: код 128, код 39 і EAN 13. Використано останній тип. Сканер штрих-коду включає в себе два кроки для автоматичного сканування всіх штрих-кодів: знаходження розташування штрих-коду; декодування штрих-коду. Для локалізації зображення штрих-коду, який захоплюється системою, використаний алгоритм Ораціо Галло і Роберто Мандучі. З метою отримання згладженої карти, використано блокувальний фільтр певного розміру з урахуванням розміру вхідного зображення коду. Крім локалізації коду, виконується його обрізка: розглядається інтенсивність кожного пікселя і виділяються рядки штрих-коду (пікселі з інтенсивністю більше нуля). Зображення з полішеною контрастністю перетворюється в двійкову форму для перетворення в ідеальне зображення, кожен стовпець зображення сканується і перевіряється на максимальну кількість пікселів з інтенсивністю нуль або одиниця. В роботі окрему увагу приділено опису процесу виявлення границь зображення. Алгоритм декодування використовує масив смуг ширини коду. Всі вище викладені підходи та на їх основі алгоритми, реалізовані у вигляді мобільного додатку розпізнавання та генерації кодів.

**Ключові слова:** розпізнавання, генерація, бінаризація, афінне перетворення, штрих-код.

## РАСПОЗНАВАНИЕ И ГЕНЕРАЦИЯ QR/BAR-КОДОВ В МОБИЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

Никоненко А.Н., Короткая Л.И.

Статья посвящена анализу методов распознавания и генерации QR/bar кодов в мобильных приложениях. Рассмотрены наиболее распространенные алгоритмы детектирования и кодирования кодов: метод Оцу, коды Риды-Соломона, алгоритм двоичного кодирования, подход Орацио Галло и Роберто Мандучи. В работе предлагается использовать алгоритм, базирующийся на указанных подходах, который доработан и использован для программной реализации мобильного приложения. Основными этапами процесса распознавания в работе являются: конвертация цветного изображения в оттенки серого (используется метод разности оттенков пикселей); бинариза-

ция серого изображения (алгоритм Оцу); использование аффинных преобразований для сохранения параллельности, которые включают поворот, растяжение, сдвиг, масштабирование. Основными этапами процесса генерации QR-кодов являются: обработка и приведение к стандартному для QR кодов виду; процесс генерации бинарной строки (в работе рассматривались данные только численного и символического типов); подсчет общего количества символов в исходной строке и преобразование десятичного числа в бинарное представление; определение длины генерируемой бинарной строки согласно стандарту компании Denso Wave (кодирование символьных типов осуществляется иначе); определение необходимой длины конечной бинарной строки; вспомогательные токены конкатенируются; генерация кодов Рида-Соломона для коррекции ошибок. В работе рассмотрены три типа штрих-кодов: код 128, код 39 и EAN 13. Использован последний тип. Сканер штрих-кода включает в себя два шага для автоматического сканирования всех штрих-кодов: нахождение местоположения штрих-кода; декодирование штрих-кода. Для локализации изображения штрих-кода, который захватывается системой, использован алгоритм Орацио Галло и Роберто Мандучи. С целью получения сглаженной карты, использован блочный фильтр определенного размера с учетом размера входного изображения кода. Помимо локализации кода, выполняется его обрезка: рассматривается интенсивность каждого пикселя и выделяются строки штрих-кода (пиксели с интенсивностью больше нуля). Изображение с улучшенной контрастностью преобразуется в двоичную форму и для преобразования в идеальное изображение, каждый столбец изображения сканируется и проверяется на максимальное количество пикселей с интенсивностью ноль или единица. В работе отдельно внимание уделено описанию процесса обнаружения краев. Алгоритм декодирования использует массив полос ширины кода. Все выше изложенные подходы и на их основе алгоритмы, реализованы в виде мобильного приложения распознавания и генерации кодов.

**Ключевые слова:** распознавание, генерация, бинаризация, аффинные преобразования, штрих-код.

## RECOGNITION AND GENERATION OF QR/BAR CODES IN MOBILE APPLICATIONS

*Nikonenko A.N., Korotka L.I.*

Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

*The article is devoted to the analysis of methods of recognition and generation of QR/bar codes in mobile applications. The most common algorithms for detecting and generating codes are considered: Otsu method, Reed-Solomon codes, binary coding algorithm, Orazio Gallo and Roberto Manduchi approach. In this article, it is proposed to use an algorithm based on these approaches, which is refined and used for the software implementation of the mobile application. The main stages of the recognition process in the work are: converting a color image into gray shades (using the pixel hue difference method); gray image binarization (Otsu algorithm); using affine transformations to preserve parallelism, which includes rotation, stretching, shifting, scaling. The main stages of the generating process for QR codes are: processing and reduction to the standard form for QR codes; the process of generating a binary string (in the work data of only numerical and symbolic types was considered); counting the total number of characters in the source string and converting the decimal number to a binary representation; determining the length of the generated binary string according to the Denso Wave standard (the encoding of character types is different); determining the required length of the final binary string; auxiliary tokens are concatenated; generation of Reed-Solomon error correction codes. Three types of bar codes are considered: code 128, code 39, and EAN 13. The last type was used. A bar code scanner includes two steps for automatically*

*scanning all bar codes: finding the location of the bar code, bar code decoding. To localize the image and the bar code that is captured by the system, the algorithm of Orazio Gallo and Roberto Manduchi is used. In order to obtain a smoothed map, a block filter of a certain size was used, taking into account the size of the input code image. In addition to the code localization, it is cut off: the intensity of each pixel is taken into account, and the lines of the bar code (pixels with an intensity greater than zero) are highlighted. An image with improved contrast is converted to binary form, and to convert to an ideal image, each image column is scanned and checked for the maximum number of pixels with an intensity of zero or one. This article focuses on describing the edge detection process. The decoding algorithm uses an array of code width bands. All the above approaches and algorithms based on them are implemented as a mobile application for recognition and generation of codes.*

**Keywords:** recognition, generation, binarization, affine transformations, bar code.

## REFERENCES

1. Korotka L.I., Nikonenko A.N. Mathematical methods for processing multidimensional data // MATERIALS III-rd International scientific-technical conference COMPUTER MODELING AND OPTIMIZATION OF COMPLEX SYSTEMS (Dnipro, 1-3 November 2017). Dnipro: USUCT, 2017, pp. 116-117 (DOI: <http://dx.doi.org/10.32434/CMOCS-2017>).
2. ISO/IEC 18004:2015 Information – Automatic identification and data capture techniques – QR Code BARcode symbology specification. Available at: <https://www.iso.org/standard/62021.html>
3. ISO/IEC 18004:2000 Information technology – Automatic identification and data capture techniques – BAR code symbology – QR code. Available at: <https://www.iso.org/standard/30789.html>
4. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms // IEEE Trans. Sys., Man., Cyber. 1979, vol.9, Issue: 1, pp. 62-66. (DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076)
5. David F. Rogers, J. Alan Adams Mathematical elements for computer graphics // Second Edition. McGraw Hill Education, 2012, 611 p.
6. Gill, John Definition of BCH codes // Stanford University. EE387 Notes #7. 2014, pp. 24-86. Available at: <https://web.archive.org/web/20140630172526/http://web.stanford.edu/class/ee387/handouts/notes7>.
7. Chai D, Hock F, “Locating and Decoding EAN-13 BARcodes from Images Captured by Digital Cameras,” Information, Communications and Signal Processing, Fifth International Conference, 2005, pp. 1595-1599, doi: 10.1109/ICICS.2005.1689328
8. Gallo, O., Manduchi, R., “Reading 1D BARcodes with Mobile Phones Using Deformable Templates,” Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions, 2011, vol.33, no.9, pp.1834-1843 (doi: 10.1109/TPAMI.2010.229).

УДК 51-74: 519.673

*Олевский В.И.<sup>а</sup>, Олевский А.В.<sup>б</sup>***НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗГИБА УПРУГОЙ КРУГОВОЙ АРКИ С ВЫРЕЗОМ**<sup>а</sup> ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепр, Украина<sup>б</sup> ГВУЗ «Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара», г. Днепр, Украина

Конструкции, моделирование которых сводится к схеме круговой арки, широко применяются в сложных сооружениях типа плотин и перекрытий, при проектировании силовых элементов в авиа- и судостроении. Для решения различных технологических задач в толщине арки часто необходимо предусмотреть вырезы. При этом при выборе рациональных параметров конструкции необходимо делать множественные пересчеты упругого изгиба арки, поэтому в задачах оптимизации конструкции принято использовать упрощенные схемы расчета. Такие схемы часто не учитывают особенности деформирования арки с вырезами, концентрацию напряжений в таких конструкциях и изменение характера их изгиба по сравнению с цельной аркой. Особенно ярко такие особенности проявляются в арках, имеющих относительно большую высоту профиля в радиальном направлении. К таким моделям сводится расчет арки-стенки и облегченной арки из сварных листов. В работе проведен плоский расчет упругой круговой металлической арки с центральным полукруглым вырезом с различным соотношением конструктивных параметров при действии на нее равномерного внешнего давления. Для моделирования использован программный комплекс SolidWorks. Получены зависимости коэффициента концентрации напряжений в вершине выреза от соотношения размеров выреза и толщины арки, а также ее радиуса. Показано, что замена в упрощенном расчете арки с вырезом на сплошную арку, имеющую уменьшенную на радиус выреза высоту профиля, не дает представления о реальном распределении усилий и перемещений и приводит к неадекватным расчетам. Упрощенную модель можно использовать для предварительных расчетов только с учетом поправочных коэффициентов, рассчитанных в работе.

**Ключевые слова:** круговая арка, вырез, концентрация напряжений, упрощенная модель.

**DOI:** 10.32434/2521-6406-2019-5-1-43-53

Настоящую работу мы хотели бы посвятить памяти нашего друга и коллеги, кандидата физико-математических наук, доктора технических наук, профессора Бараненко Валерия Алексеевича, известного ученого в области динамического программирования, нечеткого моделирования и оптимизации механических конструкций, в работах которого впервые были рассмотрены подобные задачи [1].

*Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными практическими задачами*

Известно, что в современной промышленности и строительстве широкое применение

находят элементы несущих конструкций типа балок и арок [1]. В результате силовых воздействий в таких элементах возникают неравномерные поля напряжений, без детального изучения которых невозможно обеспечить прочность и надежность работы всей конструкции. Конструкции, моделирование которых сводится к схеме круговой арки, широко применяются в сложных сооружениях типа плотин и перекрытий, при проектировании силовых элементов в авиа- и судостроении [2,3]. В строительстве арки применяются при возведении мостов, павильонов, крытых рынков, ангаров, спортивных залов и

других строений большой площади. Расход материала при сооружении арки оказывается значительно меньше, чем при создании балочных и рамных систем, при этом арки просты в изготовлении и монтаже.

Для решения различных технологических задач в толщине арки часто необходимо предусмотреть вырезы [2–4]. При нечетком моделировании или при выборе рациональных параметров конструкции необходимо делать множественные пересчеты упругого изгиба арки, поэтому в таких задачах принято использовать упрощенные схемы расчета для уменьшения времени компьютерного моделирования при сохранении точности [1,5,6]. Таким образом, корректный упрощенный расчет арки с вырезом представляет существенный практический интерес.

#### **Анализ публикаций, выделение нерешенных частей проблемы**

Проблеме расчета арок, в том числе ослабленных вырезами и отверстиями, посвящено множество работ [1,3–13]. К сходным задачам приводится расчет осесимметричных оболочек при действии давления и решение плоских задач теории упругости [7,10,14,15]. Расчеты и эксперименты, проведенные в рассматриваемых работах, показывают, что арка деформируется неоднородно. Основное внимание авторами уделяется вопросу крепления концов арки при отсутствии вырезов [15] и оптимизации формы выреза при его наличии [3–6,11]. Главным фактором, обуславливающим разрушение конструкции при устойчивом деформировании, является концентрация напряжений [3–5,7].

Анализ работ показывает, что используемые упрощенные схемы [7–10] часто не учитывают особенности деформирования арки с вы-

резами, концентрацию напряжений в таких конструкциях и изменение характера их изгиба по сравнению с цельной аркой. Особенно ярко такие особенности проявляются в арках, имеющих относительно большую высоту профиля в радиальном направлении, то есть для арки-стенки и облегченной арки из сварных листов [6,7], и требуют дополнительного более подробного рассмотрения.

#### **Формулирование целей статьи и постановка задачи**

Задачей настоящей работы является анализ возможности замены расчетной схемы арки с круговым вырезом эквивалентной аркой без выреза меньшей толщины. С этой целью в работе проведен плоский расчет упругой круговой металлической арки в виде полукольца, такой же арки с центральным полукруглым вырезом [12–14], а также арки без выреза с высотой сечения, равной разности высоты сечения исходной арки и радиуса выреза при действии на них равномерного внешнего давления. Выбор в качестве нагрузки равномерного внешнего давления обусловлен наиболее характерной формой использования арок.

#### **Изложение основного материала исследования**

Соотношение конструктивных параметров варьировалось в следующих пределах: радиус арки  $R$  принимался равным 10 м, высота сечения  $h$  – 1 м и 2 м; радиус выреза  $r$  изменялся от  $0,05h$  до  $0,5h$ ; высота сечения приведенной арки принималась равной  $h-r$ . Схема арок при  $h=1$  м и  $r=0,5$  м, использованная для моделирования, приведена на рис. 1.

Рассматривалось равномерное внешнее давление интенсивностью 500 Па, приложенное к внешней границе арки. Материал арки – легированная конструкционная сталь марки 20ХГСА,

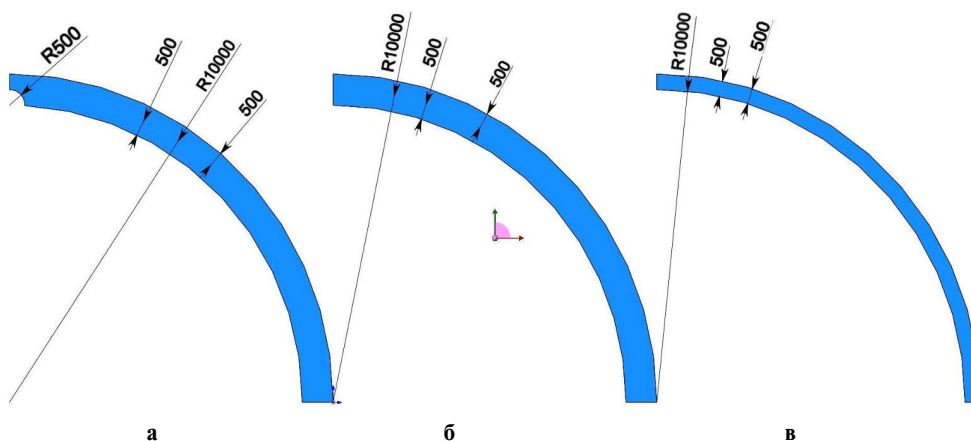


Рис. 1. Геометрическая схема расчета арок: а – с вырезом (модель I), б – без выреза (модель II), в – приведенная (модель III)

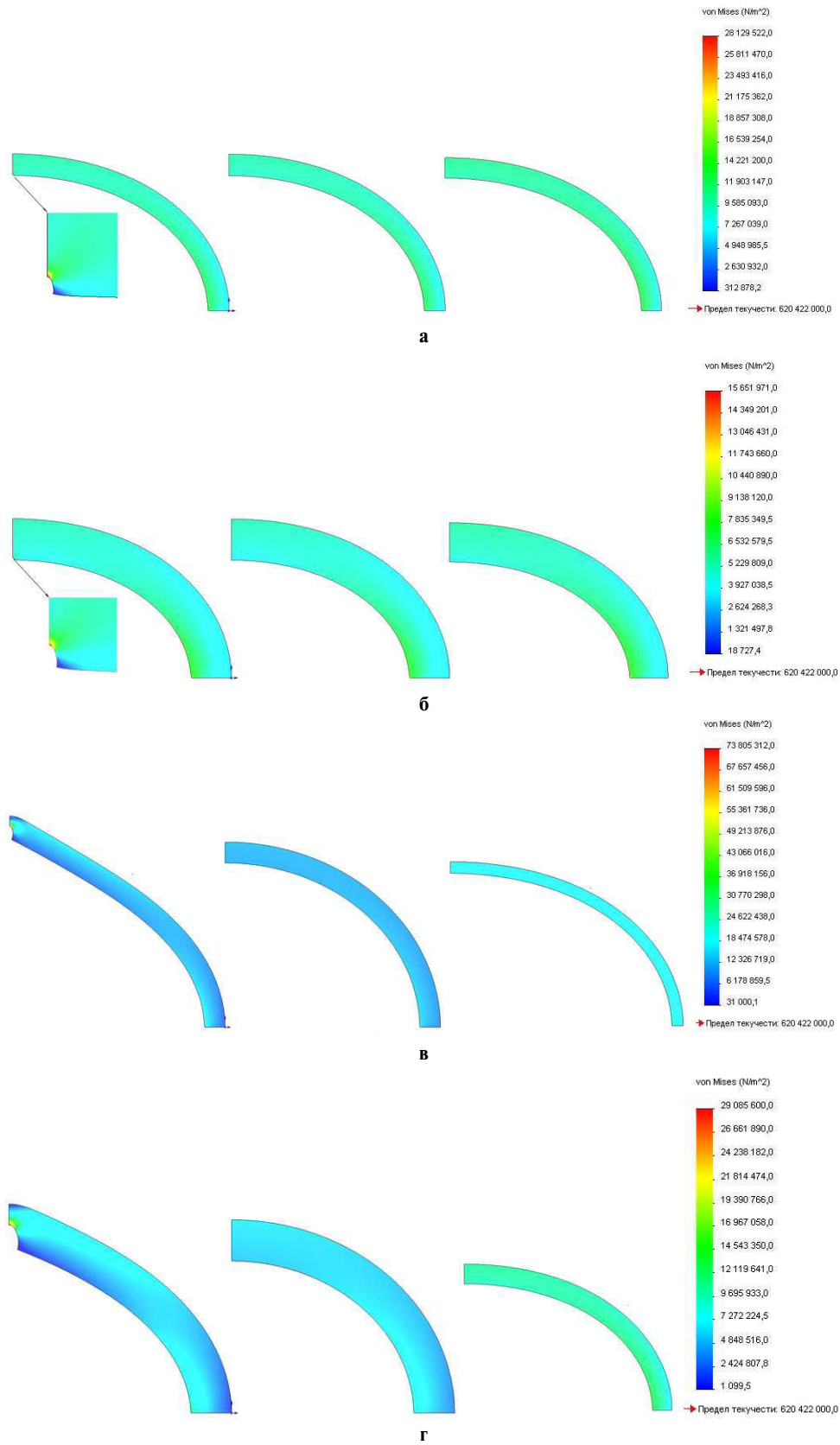


Рис. 2. Напряжения по Мизесу в упругих арках:  
 а –  $r=0,05h$ ,  $h=1$  м; б –  $r=0,05h$ ,  $h=2$  м; в –  $r=0,5h$ ,  $h=1$  м; г –  $r=0,5h$ ,  $h=2$  м



модуль Юнга  $2,1 \cdot 10^5$  МПа, предел текучести 0,62 ГПа, коэффициент Пуассона 0,28. Нижний срез арки жестко заделан или шарнирно оперт, а верхний имеет скользящую в вертикальном направлении жесткую заделку, что соответствует условиям симметрии полукруглой арки. Для моделирования использован программный комплекс SolidWorks [16]. Сетка генерировалась автоматически, перестраивалась адаптивно к форме объекта, минимальное количество элементов вдоль участка дуги арки составляло 36, максимальный размер ячейки составлял 25 мм. Расчет производился со сгущением сетки до достижения заданной точности. Напряжения по Мизесу [17] и перемещения приведены на рис. 2–10.

На рисунках показана утрированная форма деформированной арки (перемещения увеличены в 200 раз), порядок расположения объектов на рисунках соответствует расположению их на рис. 1 (в дальнейшем будем называть их модели I, II и III).

Анализ результатов расчета при жесткой заделке нижнего конца арок (рис. 2–7) показывает, что напряжения и перемещения неоднородны как по длине арки, так и по высоте ее сечения. Поведение арки с вырезом и без него существенно отличаются между собой.

У арки без выреза максимальные напряжения достигаются с внутренней стороны сечения в зоне заделки (рис. 2,а, рис. 2,б).

У арки с вырезом в этой области также имеется значительная концентрация напряжений, но максимальные напряжения достигают-

ся в вершине выреза (рис. 2,в, рис. 2,д). Несмотря на то, что такие напряжения достигаются лишь в очень малой области сечения (на рис. 2,а, рис. 2,б зона концентрации напряжений увеличена и указана стрелкой), расчет арки с учетом пластических свойств материала показывает увеличение зоны пластического деформирования при увеличении нагрузки (рис. 3). Это означает, что разрушение наступает именно в зоне концентрации максимальных напряжений в вершине выреза.

Сравнение полей перемещений, абсолютные значения которых приведены на рис. 4–6, позволяет сделать вывод о смене характера прогиба арки с вырезом при увеличении радиуса выреза:

- для малых значений радиуса выреза  $0,05h \leq r \leq 0,3h$  характерна форма деформирования с максимумом в зоне вершины арки (или верхнем конце рассматриваемой четверти арки) (рис. 4). Такая форма деформирования близка к перемещениям арки без выреза (модели II, III);

- с увеличением радиуса выреза в диапазоне  $0,4h \leq r \leq 0,5h$  зона максимальных перемещений удаляется от верхнего среза (рис. 6);

- значение  $0,3h \leq r \leq 0,4h$  является переходным от одного типа изгиба к другому (рис. 5).

Изменение характера деформирования связано с уменьшением сопротивления в зоне выреза и перестройкой напряженного состояния в форму с увеличением концентрации напряжений в вершине выреза. Это изменение характеризует переход выреза из фактора локальной прочности к виду конструктивного элемента, изменяющего характер деформирования объекта как единого целого.

Расчет коэффициента концентрации напряжений  $K$  в арке с вырезом (модель I) и приведенной арки без выреза (модель III) по сравнению с максимальными напряжениями исходной арки без выреза (модель II) для случая жесткой заделки нижнего торца приведены на рис. 7,а. На рис. 7,б приведены коэффициент отношения амплитуд максимальных перемещений  $k$  в арке с вырезом (модель I) и в приведенной арке без выреза (модель III) по сравнению с максимальными напряжениями исходной арки без выреза (модель II) для случая жесткой заделки нижнего конца арок.

На графиках четко видно качественное изменение, соответствующее диапазонам смены характера деформирования арки с вырезом.

Расчет арок с шарнирной заделкой нижнего торца приведен на рис. 8–9 и качественно

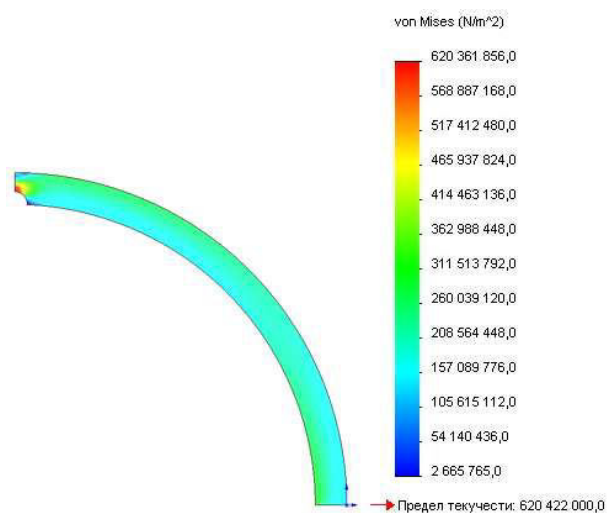


Рис. 3. Напряжения по Мизесу в арках с большим вырезом при расчете пластического деформирования ( $r=0,5h$ ,  $h=2$  м)



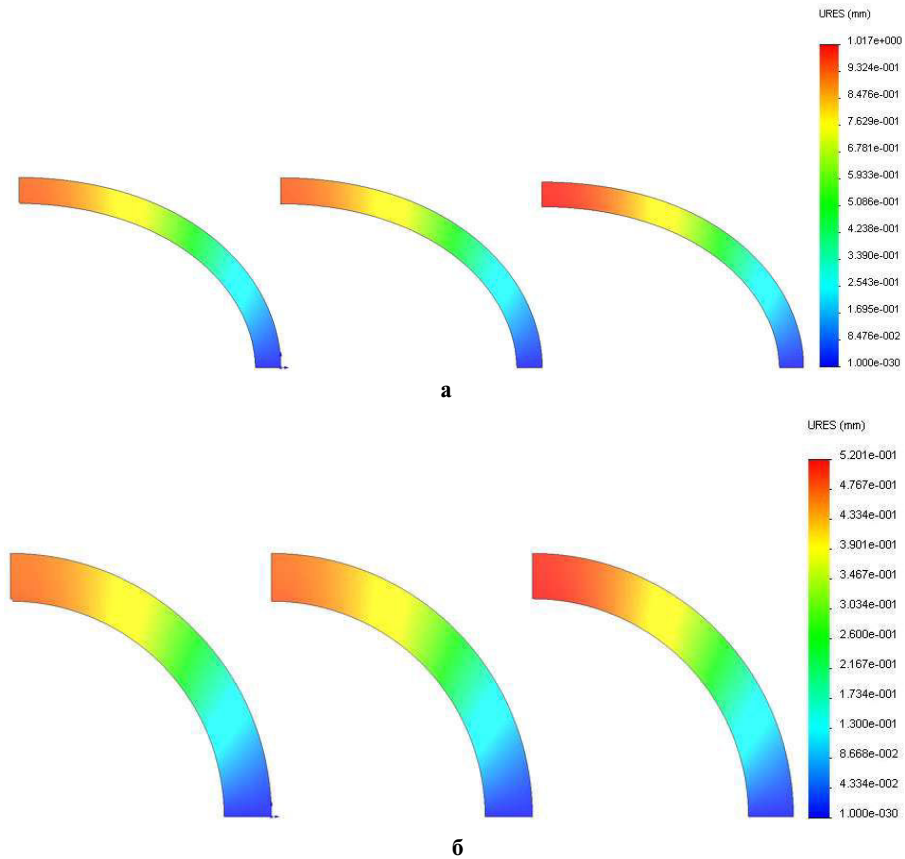


Рис. 4. Амплитуды перемещения в арках с малым вырезом  $r=0,05h$ : а –  $h=1$  м; б –  $h=2$  м

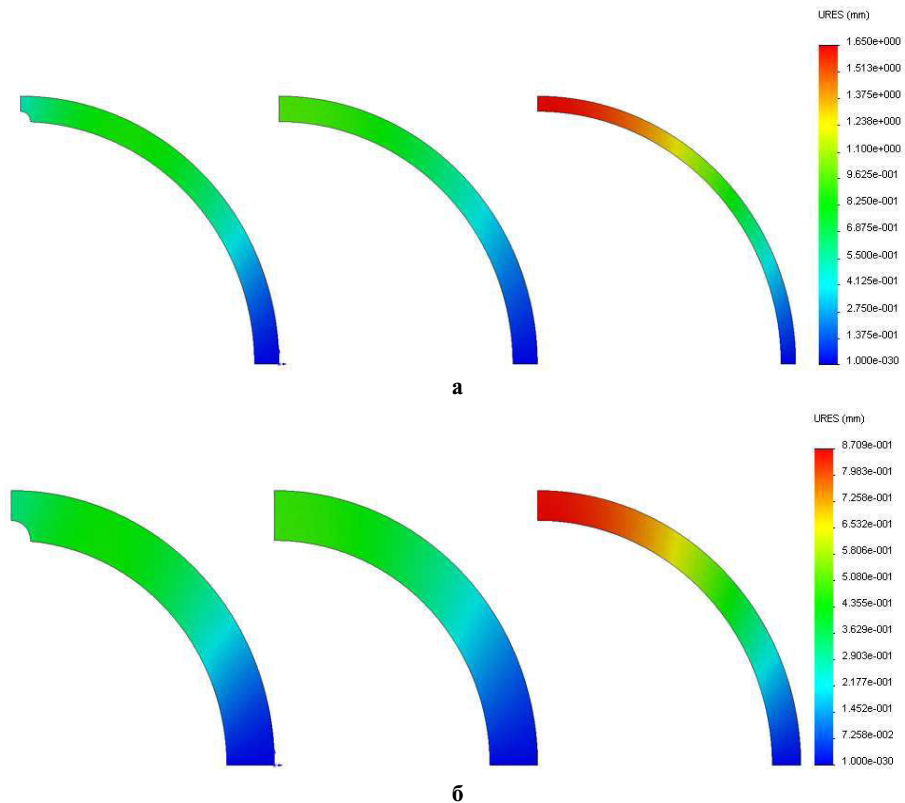


Рис. 5. Амплитуды перемещения в арках с вырезом  $r=0,4h$ : а –  $h=1$  м; б –  $h=2$  м

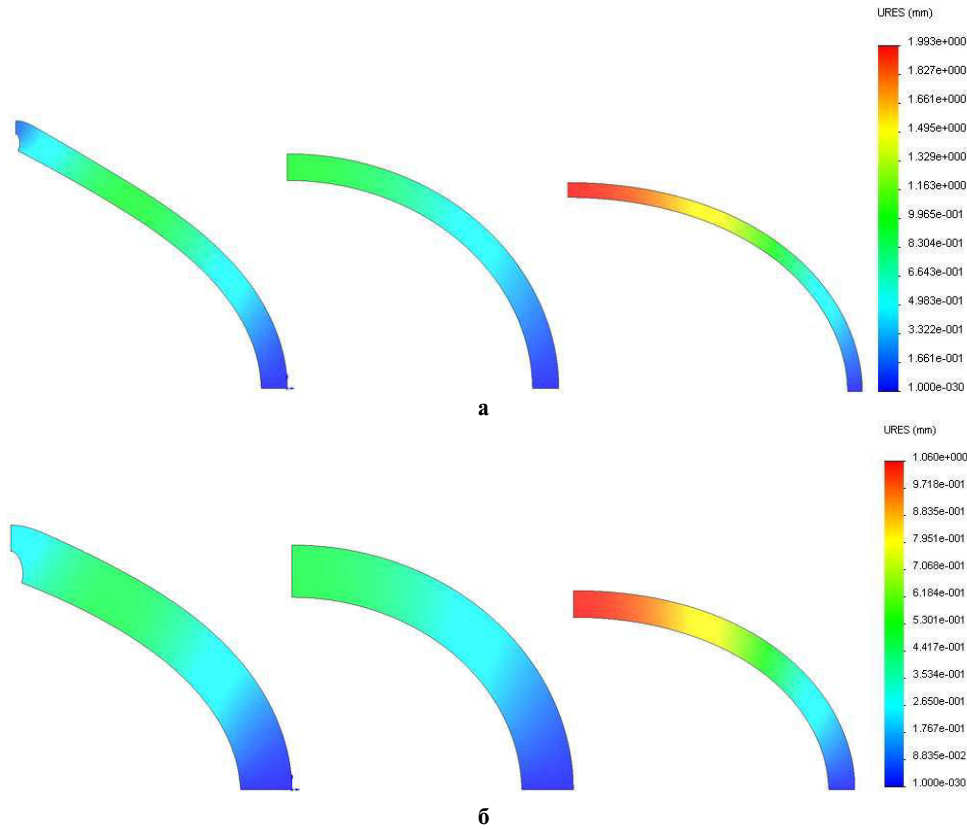


Рис. 6. Амплитуды перемещения в арках с большим вырезом  $\gamma=0,5h$ : а –  $h=1$  м; б –  $h=2$  м

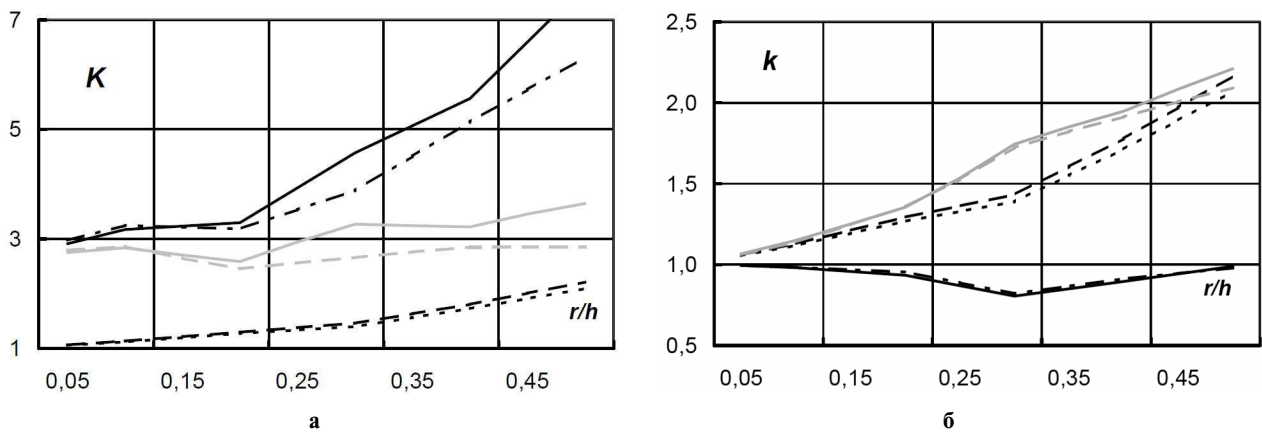


Рис. 7. Соотношения максимальных значений параметров моделей: а – напряжения, б – перемещения (сплошная черная линия – I к II,  $h=1$  м, штрихпунктирная линия – I к II,  $h=2$  м, штриховая черная линия – III к II,  $h=1$  м, пунктирная линия – III к II,  $h=2$  м, сплошная серая линия – I к III для напряжений и III к I для перемещений,  $h=1$  м, штриховая серая линия – I к III для напряжений и III к I для перемещений)

мало отличается от случая жесткой заделки.

Расчет коэффициента концентрации напряжений  $K$  в арке с вырезом (модель I) и приведенной арки без выреза (модель III) по сравнению с максимальными напряжениями исходной арки без выреза (модель II) для случая шарнирной заделки нижнего торца приведены на рис. 10,а. На рис. 10,б приведены коэффициен-

ты отношения амплитуд максимальных перемещений  $k$  в арке с вырезом (модель I) и в приведенной арке без выреза (модель III) по сравнению с максимальными напряжениями исходной арки без выреза (модель II) для случая шарнирной заделки нижнего конца арок.

В [18] приведены значения коэффициента концентрации нормальных напряжений для чи-

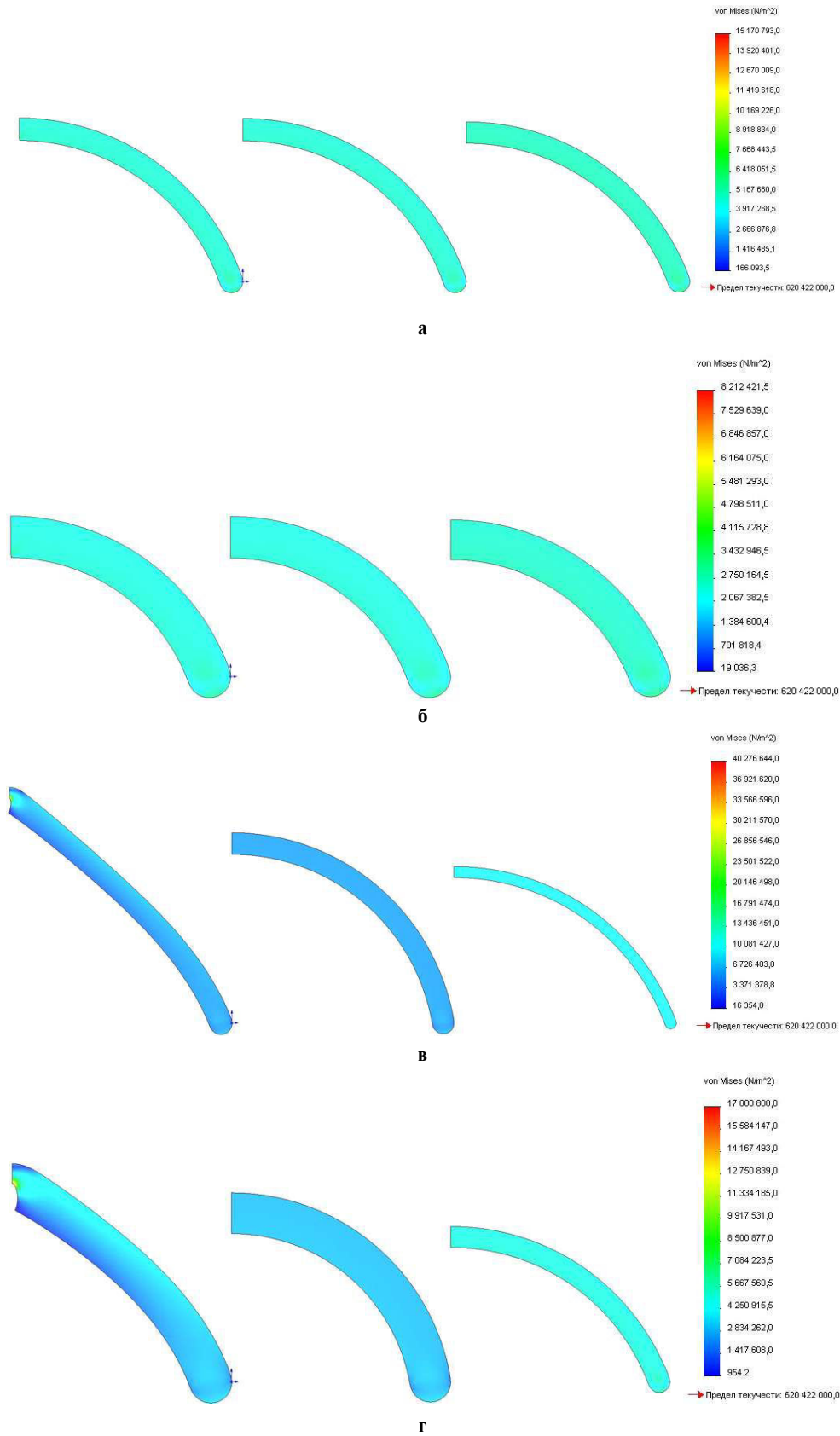


Рис. 8. Напряжения по Мизесу в упругих арках:  
 а –  $r=0,05h$ ,  $h=1$  м; б –  $r=0,05h$ ,  $h=2$  м; в –  $r=0,5h$ ,  $h=1$  м; г –  $r=0,5h$ ,  $h=2$  м

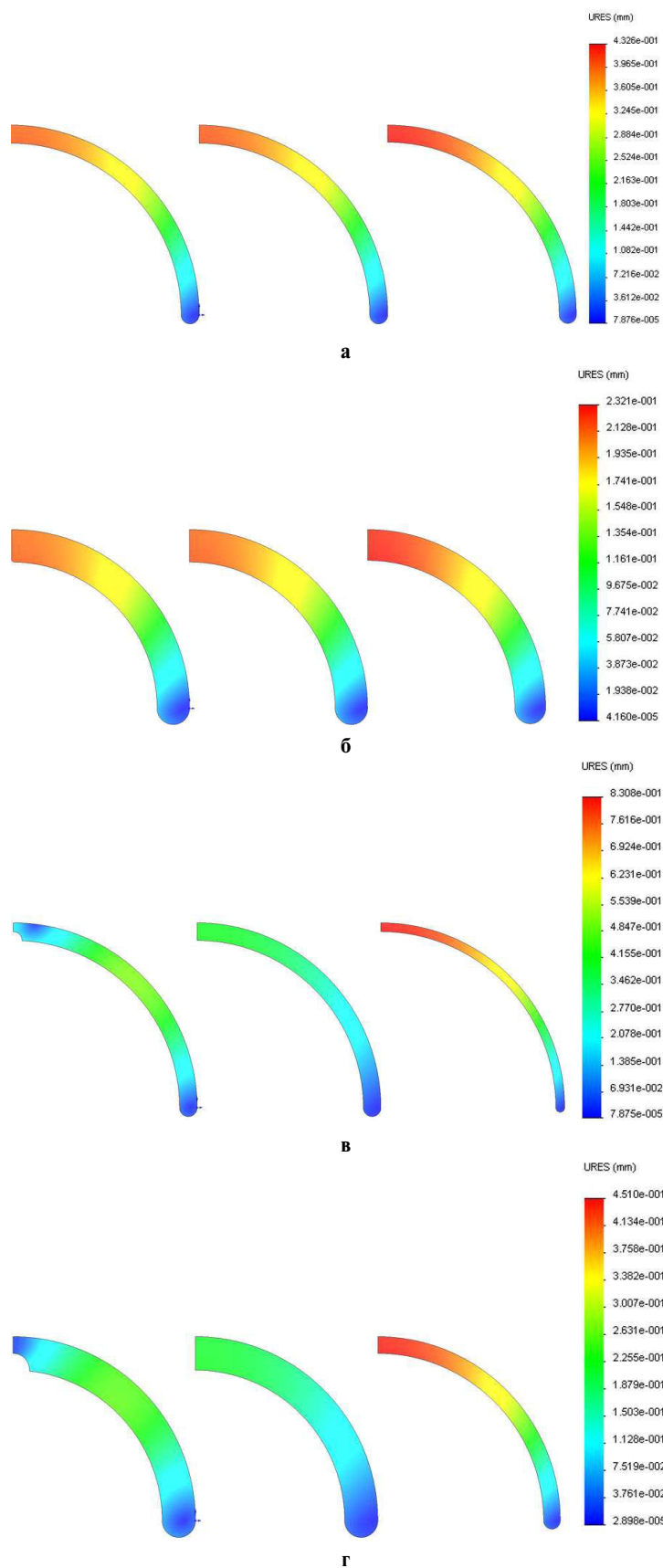


Рис. 9. Амплитуды перемещения в арках: а –  $r=0,05h, h=1$  м; б –  $r=0,05h, h=2$  м; в –  $r=0,5h, h=1$  м; г –  $r=0,5h, h=2$  м

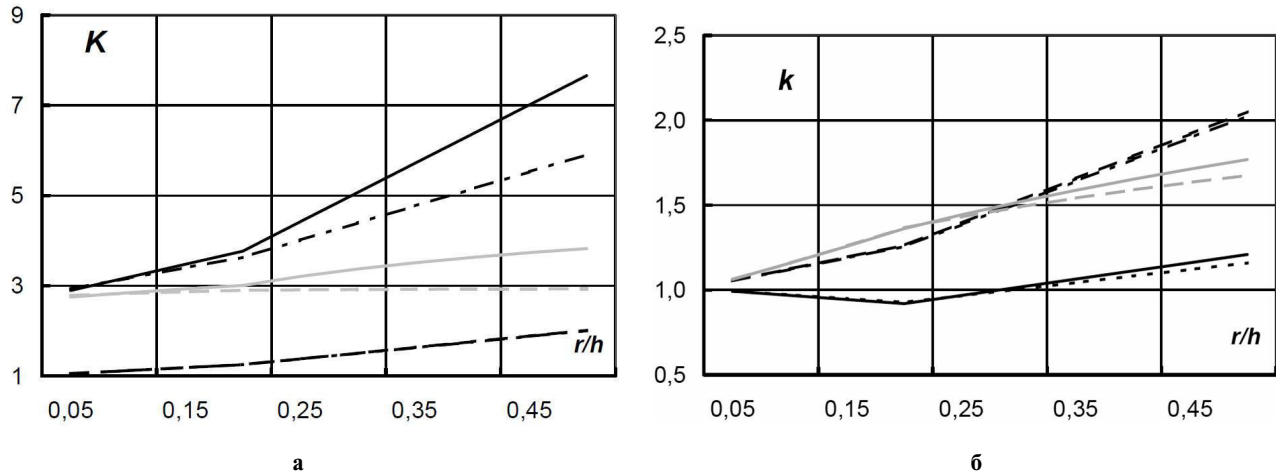


Рис. 10. Соотношения максимальных значений параметров моделей: а – напряжения, б – перемещения (сплошная черная линия – I к II, h=1 м, штрихпунктирная линия – I к II, h=2 м, штриховая черная линия – III к II, h=1 м, пунктирная линия – III к II, h=2 м, сплошная серая линия – I к III для напряжений и III к I для перемещений, h=1 м, штриховая серая линия – I к III для напряжений и III к I для перемещений)

стого изгиба бесконечной полосы с односторонним полукруглым вырезом в ее плоскости. Сравнение результатов расчета с данными [18] показывает, что для арки коэффициент концентрации напряжения по сравнению с номинальным, полученным для приведенной арки без выреза, выше примерно на 20%, чем для полосы. Это естественно, поскольку в [18] не учитывается кривизна и конечный объем конструкции. Кроме того, в [18] не приведены данные для вырезов в диапазоне  $0,3h \leq r \leq 0,5h$ , а такие вырезы наиболее часто используются при изготовлении технологических отверстий в облегченных арках.

Основываясь на данных расчета для рассматриваемого вида нагрузки можно предложить следующие приближенные формулы для определения мажорирующих коэффициентов K концентрации приведенных по Мизесу напряжений в следующем виде:

$$K=3 \text{ для } 0,05h \leq r \leq 0,2h,$$

$$K=3,2+2,5(r/h) \text{ для } 0,25h \leq r \leq 0,5h.$$

При расчете деформирования арки следует также принимать коэффициент k увеличения максимальных перемещений для приведенной арки по формуле

$$K=1,06+2,5(r/h).$$

Применение указанных коэффициентов

позволяет производить приближенный предварительный расчет арки с вырезом при действии внешнего давления и значительно снижает объем необходимых расчетов при варьировании параметров. При этом следует помнить, что расположение критических точек максимальных напряжений и перемещений у приведенной арки и арки с вырезом отличается. Это особенно важно при проведении оптимизации конструкции с кинематическими ограничениями и, в частности, методом динамического программирования [1].

**Выводы**

В работе проведен плоский расчет упругой круговой металлической арки с центральным полукруглым вырезом с различным соотношением конструктивных параметров при действии на нее равномерного внешнего давления. Для моделирования использован программный комплекс SolidWorks. Получены зависимости коэффициента концентрации напряжений в вершине выреза от соотношения размеров выреза и толщины арки, а также ее радиуса. Показано, что замена в упрощенном расчете арки с вырезом на сплошную арку, имеющую уменьшенную на радиус выреза высоту профиля, не дает представления о реальном распределении усилий и перемещений и приводит к неадекватным расчетам. Для предварительных расчетов можно использовать упрощенную модель только с учетом поправочных коэффициентов, рассчитанных в работе.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Почтман Ю.М., Бараненко В.А. Динамическое программирование в задачах строительной механики. – М.: Стройиздат, 1975. – 112 с.
2. Эйгенсон С.Н., Корихин Н.В., Головин А.И. Экспериментальное исследование напряженного состояния некоторых ответственных конструкций крупных гидроэнергетических сооружений // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 1 (45). – С.59-70.
3. Мавлютов Р.Р. Концентрация напряжений в элементах авиационных конструкций. – М.: Наука, 1981. – 142 с.
4. Конструктивно-технологические методы повышения усталостной долговечности элементов конструкции планера самолета в зоне функциональных отверстий / Кива Д.С., Кривов Г.А., Семенцов В.Ф. и др. – Киев: КВИЦ, 2015. – 188 с.
5. Дукарский Ю.М., Михайлова О.В. Оптимизация конструктивного решения и анализ напряженного состояния стальных балок с перфорированной стенкой // Сб. материалов НТК МГУП. – М.: МГУП, 2002. – С.82-84.
6. Лаврова А.С. Совершенствование методов расчета перфорированных балок с круглыми вырезами с помощью конечно-элементного анализа и моделирования: Дис..канд. техн. наук: 05.23.01. – Калининград: Калининградский государственный технический университет, 2018. – 167 с.
7. Вайнберг Д.В. Концентрация напряжений в пластинах около отверстий и выкружек. – Киев: Техника, 1969. – 220 с.
8. Власов А.Н., Соватарова В.Л., Талонов А.В. Описание физических процессов в структурно неоднородных средах. – М.: РУДН, 2009. – 258 с.
9. Григolloк Э. И. Напряженное состояние вблизи отверстий // Некоторые прикладные задачи теории пластин и оболочек. – М.: МГУ, 1981. – С.226-237.
10. Колтаков А.Г. К расчету пластины с локальным возмущением формы // Прикладная механика и техническая физика. – 2012. – Т. 53, № 4. – С. 171-182.
11. Притыкин А.И. Концентрация напряжений во флорах с круглыми и овальными вырезами // Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология. – 2009. – № 1. – С.76-81.
12. Саленко С.Д., Шевченко С.С. Снижение концентрации напряжений в окрестности одностороннего выреза в пластине // Судостроение. – 2013. – № 5 (820). – С.32-33.
13. Zhang L.L., Yang Z., Hou J., Wang Z. Q. The Stress and Strain Concentrations in Curved Beams of Finite Thickness with End Moments // Advanced Materials Research. – 2011. – Vols. 163-167. – P.2953-2963.
14. Семенов-Ежов И.Е., Ширишов А.А. Концентрация напряжений в толстостенных цилиндрических оболочках и корпусных деталях при действии давления // Инженерный вестник. – 2015. – № 5. – С.1-12.
15. Savin G.N. The stress distribution in a thin shell with

an arbitrary hole // Problems of Continuum Mechanics. – Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics. – 1961. – P. 382-405.

16. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 562 с.

17. Monchiet V., Kondo D., Charkaluk E., Oana C. Macroscopic yield criteria for plastic anisotropic materials containing spheroidal voids // International Journal of Plasticity. – 2008. – Vol. 24 (7). – P.1158-1189.

18. Pilkey W.D. and Pilkey D.F. Peterson's Stress Concentration Factors, Third Edition. – New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2008. – 522 p.

Поступила в редакцию 13.05.2019

### ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЗГИНУ ПРУЖНОЇ КРУГОВОЇ АРКИ З ВИРІЗОМ

**Олевський В.І., Олевський О.В.**

*Конструкції, моделювання яких зводиться до схеми кругової арки, широко застосовуються в складних спорудах типу гребель і перекриттів, при проектуванні силових елементів в авіа- і суднобудуванні. Для вирішення різних технологічних завдань у товщині арки часто необхідно передбачити вирізи. При цьому при виборі раціональних параметрів конструкції необхідно робити множинні перерахунки пружного вигину арки, тому в задачах оптимізації конструкції прийнято використовувати спрощені схеми розрахунку. Такі схеми часто не враховують особливості деформування арки з вирізами, концентрацію напружень в таких конструкціях і зміну характеру їх вигину в порівнянні з цілісною аркою. Найбільш яскраво такі особливості проявляються в арках, що мають відносно велику висоту профілю в радіальному напрямку. До таких моделей зводиться розрахунок арки-стілки і полегшеної арки зі зварних листів. В роботі виконано плоский розрахунок пружної кругової металеві арки з центральним напівкруглим вирізом з різним співвідношенням конструктивних параметрів при дії на неї рівномірного зовнішнього тиску. Для моделювання використаний програмний комплекс SolidWorks. Отримано залежності коефіцієнта концентрації напружень у вершині вирізу від співвідношення розмірів вирізу і товщини арки, а також її радіуса. Показано, що заміна в спрощеному розрахунку арки з вирізом на суцільну арку, що має зменшену на радіус вирізу висоту профілю, не дає уявлення про реальний розподіл зусиль і переміщень і призводить до неадекватних розрахунків. Спрощену модель можна використовувати для попередніх розрахунків тільки з урахуванням поправочних коефіцієнтів, розрахованих в роботі.*

**Ключові слова:** кругова арка, виріз, концентрація напружень, спрощена модель.

## SOME PECULIARITIES OF COMPUTER MODELING OF A BENDING OF ELASTIC CIRCULAR ARCH WITH NOTCH

Olevskiy V.I.<sup>a</sup>, Olevskiy O.V.<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

<sup>b</sup> Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

Structures, the modeling of which is reduced to the circular arch scheme, are widely used in complex structures such as dams and ceilings, in the design of load-bearing elements in aircraft and shipbuilding. To solve various technological problems it is often necessary to provide cuts in the thickness of the arch. In this case, when choosing rational parameters of a structure, it is necessary to make multiple recalculations of the elastic bend of the arch; therefore, it is a common practice to use simplified calculation schemes in the problems of structure optimization. Such schemes often do not take into account peculiarities of deformation in an arch with cutouts, stress concentration in such structures, and change in the nature of their bending compared to a solid arch. Such features are especially vividly manifested in arches with a relatively large profile height in a radial direction. Calculation of arch-walls and lightweight arches of welded sheets is reduced to such models. A flat calculation of an elastic circular metal arch with a central semicircular cutout with a different ratio of design parameters under the action of uniform external pressure on it was carried out. The SolidWorks software complex was used for modeling. The dependences of the stress concentration coefficient at an apex of a cutout on the ratio of the dimensions of a cutout and the thickness of an arch, as well as its radius, are obtained. It is shown that the replacement of an arch with a cutout with a solid arch, having a profile height reduced by a cutout radius, in a simplified calculation does not give an idea of the real distribution of forces and displacements and leads to inadequate calculations. The simplified model can be used for preliminary calculations only taking into account the correction factors calculated in the work.

**Keywords:** circular arch, cutout, stress concentration, simplified model.

### REFERENCES

- Pochtman Ju.M., Baranenko V.A. *Dinamicheskoe programirovanie v zadachah stroitel'noj mehaniki* [Dynamic programming in problems of structural mechanics]. Moscow, Strojizdat, 1975, 112 p. (in Russian).
- Jejgenson S.N., Korihin N.V., Golovin A.I. *Jeksperimental'noe issledovanie naprjazhennogo sostojanija nekotoryh otvetstvennyh konstrukcij krupnyh gidrojenergeticheskikh sooruzhenij* [Experimental study of the stress state of some critical structures of large hydropower facilities]. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal*, 2014, № 1(45), pp. 59-70 (in Russian).
- Mavljutov R.R. *Koncentracija naprjazhenij v jelementah aviacionnyh konstrukcij* [Stress concentration in elements of aircraft structures]. Moscow, Nauka, 1981, 142 p. (in Russian).
- Kiva D.S., Krivov G.A., Semencov V.F. i dr. *Konstruktivno-tehnologicheskie metody povyshenija ustalostnoj dolgovechnosti jelementov konstrukcii planera samoleta v zone funkcional'nyh otverstij* [Constructive-technological methods for increasing the fatigue life of structural elements of the airframe of an airplane in the area of functional openings]. Kiev, KVIC, 2015, 188 p. (in Russian).
- Dukarskij Ju.M., Mihajlova O.V. *Optimizacija konstruktivnogo reshenija i analiz naprjazhennogo sostojanija stal'nyh balok s perforirovannoj stenкой* [Optimization of the constructive solution and analysis of the stress state of steel beams with a perforated wall]. Sb. materialov NTK MGUP, Moscow, MGUP, 2002, pp. 82-84. (in Russian).
- Lavrova A.S. *Sovershenstvovanie metodov rascheta perforirovannyh balok s kruglymi vyrezami s pomoshh'ju konechno-jelementnogo analiza i modelirovanija* [Improving methods for calculating perforated round-cut beams using finite element analysis and modeling]. Dis...kand. tehn. nauk: 05.23.01, Kaliningrad, Kaliningradskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet, 2018, 167 p. (in Russian).
- Vajnberg D.V. *Koncentracija naprjazhenij v plastinah okolo otverstij i vykruzhek* [The concentration of stresses in the plates near the holes and fillets]. Kiev, Tehnika, 1969, 220 p. (in Russian).
- Vlasov A.N., Sovatarova V.L., Talonov A.V. *Opisanie fizicheskikh processov v strukturno neodnorodnyh sredah* [Description of physical processes in structurally inhomogeneous media]. Moscow, RUDN, 2009, 258 p. (in Russian).
- Grigoljuk Je. I. *Naprjazhennoe sostojanie vblizi otverstij* [Stress near holes]. *Nekotorye prikladnye zadachi teorii plastin i obolochek*, Moscow, MGU, 1981, pp. 226-237. (in Russian).
- Kolpakov A.G. *K raschetu plastiny s lokal'nyim voz-mushheniem formy* // *Prikladnaja mehanika i tehničeskaja fizika* [To the calculation of the plate with local form perturbation]. 2012, T. 53, № 4, pp. 171-182. (in Russian).
- Pritykin A.I. *Koncentracija naprjazhenij vo florah s kruglymi i oval'nymi vyrezami* [Stress concentration in floras with round and oval cutouts]. *Vestnik AGTU. Ser. Morskaja tehnikaja i tehnologija*, 2009, no. 1, pp. 76-81. (in Russian).
- Salenko S.D., Shevchenko S.S. *Snizhenie koncentracii naprjazhenij v okrestnosti odностороннего vyreza v plastine* [The decrease in stress concentration in the vicinity of one-side cut in the plate]. *Sudostroenie*, 2013, no. 5(820), pp. 32-33 (in Russian).
- Zhang L.L., Yang Z., Hou J., Wang Z. Q. The Stress and Strain Concentrations in Curved Beams of Finite Thickness with End Moments. *Advanced Materials Research*, 2011, vols. 163-167, pp. 2953-2963.
- Semenov-Ezhov I.E., Shirshov A.A. *Koncentracija naprjazhenij v tolstostennyh cilindricheskikh obolochkah i korpusnyh detaljah pri dejstvii davljenja* [Stress concentration in thick-walled cylindrical shells and body parts under pressure]. *Inzhenernyj vestnik*, 2015, no. 5, pp. 1-12 (in Russian).
- Savin G.N. *The stress distribution in a thin shell with an arbitrary hole*. // *Problems of Continuum Mechanics*. Philadelphia, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1961, pp. 382-405.
- Aljamovskij A.A. *SolidWorks Simulation. Inzhenernyj analiz dlja professionalov: zadachi, metody, rekomendacii* [SolidWorks Simulation. Engineering analysis for professionals: objectives, methods, recommendations]. Moscow, DMK Press, 2015, 562 p. (in Russian).
- Monchiet V., Kondo D., Charkaluk E., Oana C. Macroscopic yield criteria for plastic anisotropic materials containing spheroidal voids. // *International Journal of Plasticity*, 2008, Vol. 24 (7), pp. 1158-1189.
- Pilkey W.D. and Pilkey D.F. *Peterson's Stress Concentration Factors*, Third Edition. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2008, 522 p.



УДК 621.3.

*Олійник О.Ю., Тараненко Ю.К.*

## РОЗРОБКА АНАЛІТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ І ОПТИМІЗАЦІЇ ВІБРОАКУСТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТРУБОПРОВОДІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ АПАРАТІВ

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, Україна

Стаття присвячена розробці аналітичної моделі для розрахунку і оптимізації віброакустичного навантаження трубопроводів технологічних апаратів. Відхилення параметрів геометрії трубопроводу від ідеальних і неоднорідність матеріалу впливають на віброакустичне навантаження технологічних апаратів. Існуючі чисельні алгоритми розрахунків частот і форм коливань технологічних трубопроводів, які використовують для оцінювання основної частоти коливальної системи не враховують динамічні характеристики. Точність частоти коливань визначення віброакустичного навантаження залежить від вибору форми коливань, яку іноді важко заздалегідь передбачити. Практичні завдання вимагають виконання розрахункових робіт з необхідною точністю. Відсутність точного метода розрахунку частот і форм коливань трубопроводів, який би враховував тип кріплення та розташування опір, проектувальники змушені адаптувати існуючі підходи та моделі розрахунків до конкретних вимірювальних умов. Тому на практиці застосовують спрощені і наближені методи розрахунку. При наявності зосереджених мас і в разі врахування розсіювання енергії у місцях закріплення трубопроводів алгоритми розрахунку стають більш трудомісткими. В деяких випадках можливість математичної трактування завдання стає здійсненною лише за умови введення в розрахунок деяких спрощень. Запропонована аналітична модель розрахунку частот і форм коливань віброакустичного навантаження базується на методі Крилова. Визначення власних форм і частот коливань трубопроводу здійснюється інтеграцією вихідного диференціального рівняння вільних поперечних коливань для різних типів закріплення кінців. Наведені результати програмної реалізації моделі в програмному середовищі Python.

**Ключові слова:** віброчастотний метод контролю, частота, форма коливань, функції Крилова.

**DOI:** 10.32434/2521-6406-2019-5-1-54-62

### *Введення*

В технологічному обладнанні (тепломасообмінні апарати, апарати зануреного горіння, кавітаційні теплогенератори та ін.) можуть виникати сильні нелінійні коливання, які можуть істотно інтенсифікувати технологічні процеси (підвищувати теплонапруженість топкових камер (як це відбувається в камерах вібраційного горіння), покращувати тепло- і масообмін, знижувати гідравлічний опір) [1]. З іншого боку нелінійні коливання можуть призвести до неконтрольованого збільшення місцевих коефіцієнтів тепловіддачі, механічних і теплових напруг, що може призводити до руйнування еле-

ментів конструкцій [2]. Крім того, можлива ситуація, коли зворотний зв'язок між коливаннями параметрів газу і тепломасопідводом, і, таким чином, коливання можуть ставати самозбуджуваними [3].

Дослідження нелінійних коливань і процесів у апаратах, що відбуваються під впливом таких складних коливань, становить значні математичні труднощі. Тому актуальною є розробка методики контролю та досліджень резонансних нелінійних коливань, що виникають в більш простих системах, зокрема, в трубопроводах.



### **Аналіз літературних даних і постановка проблеми**

Джерела коливань трубопроводів мають різне походження, наприклад, в роботі [4] детально досліджений параметричний резонанс трубопроводів, який являє собою зростаючі коливання близько хитке становище рівноваги. Однак найбільш поширеним джерелом коливань трубопроводів є звичайний резонанс, коли частота збуджуючих коливань наближається до частоти власних коливань системи. У загальному випадку взаємодія трубопроводу з внутрішнім потоком рідини носить двосторонній характер: пульсації внутрішнього потоку рідини викликають динамічні деформації трубопроводу, а динамічні деформації трубопроводу можуть стати причиною пульсацій потоку в гідросистемі, частиною якої є трубопровід.

Для ефективного контролю необхідний точний розрахунок частот і форм коливань ділянок трубопроводу між кріпленнями з урахуванням їх розташування і жорсткості (піддатливості), що дозволить контролювати місця максимальних напружень і відповідно здійснювати ліквідацію аварійних ситуацій, що особливо важливо при перекачування легкозаймистих і сильно токсичних рідин.

Проблемою достовірного контролю є те, що визначення частот і форм коливань здійснюється наближеними методами [5–6] без урахування жорсткості (піддатливості) закріплень і їх розташування, що знижує ефективність контролю внаслідок трудомістких, а іноді і помилкових визначень місць максимальних напружень на ділянках трубопроводів.

Існуючі чисельні алгоритми розрахунків частот і форм коливань трубопроводів використовують класичну теорію коливань, метод Фур'є, метод Д'Аламбера, варіаційні методи Релея, Рітца та ін.

Відомий метод Релея застосовується головним чином для оцінки основної частоти коливальної системи, однак, інші її динамічні характеристики залишаються нерозкритими. Точність частоти коливань залежить від вибору форми коливань, яку іноді важко заздалегідь передбачити [7].

Метод Рітца є подальшим розвитком методу Релея і заснований на варіаційному принципі Гамільтона. Він дозволяє звести розрахунок системи з розподіленою масою до розрахунку більш простої системи з кінцевим числом ступенів свободи [8].

Широко відомі наближені методи визна-

чення власних частот і форм коливань трубопроводів. Основним недоліком подібних методів, що призводить часом до значних кількісних похибок розрахунку, є спрощення, прийняті при обліку крайових умов (геометричних і динамічних умов, що накладають обмеження на свободу переміщення кінців трубопроводу, а також на вигинаючий момент і поперечну силу).

Відхилення параметрів геометрії трубопроводу при експлуатації від і неоднорідність матеріалу впливають на розподіл віброакустичних навантажень. Існуючі чисельні алгоритми розрахунків частот і форм коливань трубопроводів, що використовують для оцінювання основної частоти коливальної системи не враховують динамічні характеристики, зміну густини та в'язкості рідини в середині трубопроводу. Точність частоти коливань трубопроводу також залежить від вибору форми коливань, яку іноді важко заздалегідь передбачити. Практичні завдання вимагають виконання розрахункових робіт з необхідною точністю. Відсутність аналітичного методу визначення частот і форм коливань трубопроводу, який би враховував тип кріплення та розташування опір, змушує проектувальників адаптувати існуючі підходи та моделі розрахунків до конкретних вимірювальних умов.

Тому актуальною науково-прикладною задачею є розробка аналітичної моделі розрахунку частот і форм коливань трубопроводів з урахуванням жорсткості (піддатливості) опор і їх розташування. Застосування такої моделі дозволить підвищити точність методу контролю якості технологічного процесу та суттєво спростить задачу проектування та адаптації існуючого приладного парку віброчастотних датчиків до конкретних вимірювальних задач.

### **Ціль та задачі дослідження**

Метою даної роботи є розробка аналітичної моделі для розрахунку частот і форм коливань трубопроводу з урахуванням жорсткості (піддатливості) опор і їх розташування. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розробити математичну модель аналітичного методу розрахунку частот і форм коливань трубопроводу за рахунок застосування точного спрощення основних рівнянь резонансних коливань з урахуванням жорсткості (піддатливості) опор і їх розташування;
- виконати розрахунок частоти і форми коливань трубопроводу для різних умов закріплення;
- виконати аналіз результатів розрахунків

шляхом порівняння з результатами відомих методів та оцінити точність отриманої моделі.

Розробка аналітичної моделі розрахунку віброакустичного навантаження технологічного трубопроводу

Запишемо рівняння власних коливань ділянки трубопроводу у вигляді [9]:

$$\frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} = -\frac{m}{EJ_z} \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2}. \quad (1)$$

У рівнянні (1) функція коливань  $y(x,t)$  відраховується від положення осьової лінії трубопроводу при його статичному рівновазі (без урахування прогину від власної ваги).

Застосовуючи метод Фур'є (метод поділу змінних) [4] рішення диференціальних рівнянь в приватних похідних, функцію коливань будемо шукати у вигляді:

$$y(x,t) = Y(x)T(t). \quad (2)$$

Підставляючи рішення (2) в рівняння (1) і примножуючи ліву і праву частини рівняння на

$$\frac{EJ}{m} \frac{1}{Y(x)T(t)}, \text{ маємо:}$$

$$\frac{EJ}{m} \frac{1}{Y(x)} \frac{d^4 Y(x)}{dx^4} = -\frac{1}{T(t)} \frac{d^2 T(t)}{dt^2}. \quad (3)$$

Так як функції різних аргументів можуть бути рівні тільки константі, то отримуємо два рівняння:

$$\frac{EJ_z}{m} \frac{1}{Y(x)} \frac{d^4 Y(x)}{dx^4} = \omega^2 \text{ або}$$

$$\frac{d^4 Y(x)}{dx^4} - \frac{m}{EJ_z} \omega^2 Y(x) = 0, \quad (4)$$

$$-\frac{1}{T(t)} \frac{d^2 T(t)}{dt^2} = \omega^2 \text{ або}$$

$$\frac{d^2 T(t)}{dt^2} + \omega^2 T(t) = 0. \quad (5)$$

Рівняння (6) має уявні корені характеристичного рівняння і, отже:

$$T(t) = a \sin \omega t + b \cos \omega t, \quad (6)$$

З отриманого рішення випливає, що параметр  $\omega$  визначає частоту власних коливань балки.

Рівняння (4) визначає форму коливань ділянки трубопроводу і називається диференціальним рівнянням форми коливань трубопроводу.

При переході до безрозмірного параметра (аргумент) отримаємо:

$$y(x) = AS(kx) + BT(kx) + CU(kx) + DV(kx), \quad (7)$$

де  $y(x)$  – відхилення точок осі трубопроводу від рівноважного положення;  $A, B, C, D$  – постійні підбрані так, щоб вибрані так щоб для функції  $y(x)$  виконувалися умови закріплення кінців;  $S(kx), BT(kx), CU(kx), DV(kx)$  – функція Крилова [5]:

$$S(kx) = 1/2(\operatorname{ch}kx + \operatorname{cos}kx),$$

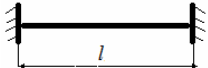
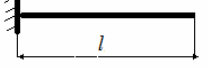
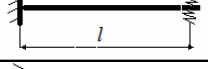
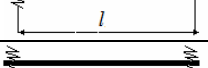




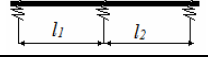
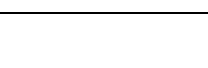
$$T(kx) = 1/2(\operatorname{sh}kx + \operatorname{sin}kx),$$

$$U(kx) = 1/2(\operatorname{ch}kx - \operatorname{cos}kx),$$

$$V(kx) = 1/2(\operatorname{sh}kx - \operatorname{sin}kx). \quad (8)$$

Таблиця 1

Схеми можливих варіантів компоновки трубопроводу на двох і трьох опорах

Номер компоновки	Тип закріплення трубопроводу на опорах
n=1	
n=2	
n=3	
n=4	
n=5	
n=6	
n=7	
n=8	
n=9	
n=10	

Розглянемо коливання трубопроводів для чотирьох основних умов закріплення кінців трубопроводу за даними [6]:

- кінець трубопроводу вільний;
- жорстке кріплення кінця трубопроводу;
- закріплення кінця трубопроводу в пружній опорі.

Функції Крилова дають змогу записати вираз загального інтеграла, що задовольняє умовам на кінці  $x=0$  і містить тільки дві постійні, які визначаються з умов на іншому кінці  $x=l$  [4]. При наявності проміжної опори вираз для запису форми головного коливання має вигляд ( $l$  довжина трубопроводу):

$$y(x) = AS(kx) + BT(kx) + CU(kx) + DV(kx),$$

при  $0 \leq x \leq l$ ;

$$y(x) = AS(kx) + BT(kx) + CU(kx) + DV(kx) + R/k^3 EI \cdot V(k(x-l)), \text{ при } l_1 \leq x \leq l_1 + l_2. \quad (9)$$

У табл. 1 наведено схеми всіх можливих варіантів кріплення трубопроводу на двох і трьох опорах урахуванням яких виконано розрахунки за літературними даними [5].

Пропонована класифікація покладена в основу розробленого програмного комплексу з розрахунку власних частот і форм коливань трубопроводу. Алгоритм розрахункової частини програми продемонстровано на прикладі.

1. Завантажуємо робочі модулі та вихідні дані з необхідними розрахунковими співвідношеннями для параметрів ділянки трубопроводу (схема 1).

2. Задаємо функції Крилова використовуючи прийом для їх багаторазового використан-

```

from scipy.optimize import * # Для вирішення чисельним методом
from numpy import * # для розрахунків
import matplotlib.pyplot as plt # графіка
import matplotlib as mpl # графіка
mpl.rcParams['font.family'] = 'fantasy' # графіка
mpl.rcParams['font.fantasy'] = 'Comic Sans MS, Arial' # графіка
L1 = 0.5 # довжина ділянки трубопроводу між опорами в м.
L2 = 1.0 # довжина ділянки трубопроводу між опорами в м.
L = L1 + L2 # довжина ділянки трубопроводу в м.
# X = x / L відносна довжина ділянки трубопроводу
d = 20e-3 # внутрішній діаметр трубопроводу в м.
dt = 1.5e-3 # товщина стінки трубопроводу в м.
D = d + 2 * dt # зовнішній діаметр трубопроводу в м.
E = 196e9 # модуль Юнга матеріалу в н / м2.
rt = 7.9e3 # масова щільність матеріалу в кг / м3.
rg = 1e3 # масова щільність рідини в кг / м3.
I = (pi / 64) * (D ** 4 - d ** 4) # статичний момент інерції труби в М4.
mg = (pi / 4) * d ** 2 * rg # маса одиниці довжини рідини в кг / м3
mt = (pi / 4) * (D ** 2 - d ** 2) * rt # маса одиниці довжини труби в кг / м3
m = mg + mt # маса одиниці довжини труби з рідиною в кг / м3
EJ = E * J # добуток модуля пружності на статичний момент інерції в н * м2
c = 1e5 # жорсткість закладення в н / м
c1 = 1e4 # жорсткість закладення в н / м
c2 = 2e4 # жорсткість закладення в н / м
c3 = 2e4 # жорсткість закладення в н / м
n = 2 # вибір компонування ділянки трубопроводу
l1 = L1 / L # відносна довжина ділянки до закріплення
l2 = L2 / L # відносна довжина ділянки до закріплення
l = l1 + l2 # загальна відносна довжина

```

Схема 1

```

def S(k,x):# функція Крилова
return (cosh(k*x)+cos(k*x))/2
def T(k,x):# функція Крилова
return (sinh(k*x)+sin(k*x))/2
def U(k,x):# функція Крилова
return (cosh(k*x)-cos(k*x))/2
def V(k,x):# функція Крилова
return (sinh(k*x)-sin(k*x))/2

```

Схема 2

```

def f(k): # функції для розрахунку коефіцієнта k форми коливань
if n==1:
return U(k,1)**2-T(k,1)*V(k,1)
elif n==2:
return S(k,1)**2-T(k,1)*V(k,1)
elif n==3:
return (k**3*EJ*S(k,1)-c*V(k,1))*S(k,1)-(k**3*EJ*V(k,1)-c*U(k,1))*T(k,1)
elif n==4:
return (k**3*EJ*T(k,1)/c+S(k,1))*V(k,1)-(k**3*EJ*U(k,1)/c+T(k,1))*U(k,1)
elif n==5:
return V(k,1)*(k**3*EJ/c*(k**3*EJ*T(k,1)-c*S(k,1))+k**3*EJ*S(k,1)-c*V(k,1))-(k**3*EJ*U(k,1)-
c*T(k,1))*(k**3*EJ/c*U(k,1)+T(k,1))
elif n==6:
a1=U(k,1);
a2=T(k,1);
a3=k**3*EJ*V(k,1)-c*U(k,1);
b1=V(k,1);
b2=U(k,1)
b3=k**3*EJ*S(k,1)-c*V(k,1);
d1=V(k,1);
d2=U(k,1)
return d1*(a2*b3-a3*b2)-d2*(a1*b3-a3*b1)
elif n==7:
a1=S(k,1);
a2=V(k,1);
a3=k**3*EJ*V(k,1)-c*U(k,1);
b1=T(k,1);
b2=S(k,1)
b3=k**3*EJ*S(k,1)-c*V(k,1);
d1=T(k,1);
d2=S(k,1)
return d1*(a2*b3-a3*b2)-d2*(a1*b3-a3*b1)
elif n==8:
a1=S(k,1);
a2=k**3*EJ*V(k,1)-c1*U(k,1);
a3=k**3*EJ*V(k,1)-c2*U(k,1);
b1=U(k,1);
b2=k**3*EJ*S(k,1)-c1*V(k,1);
b3=k**3*EJ*S(k,1)-c2*V(k,1);
d1=T(k,1);
d2=k**3*EJ*S(k,1)-c2*V(k,1);
return d1*(a2*b3-a3*b2)+d2*(a1*b2-a2*b1)
elif n==9:
a1=V(k,1);
a2=U(k,1);
a3=k**3*EJ*U(k,1)-c2*T(k,1);
b1=k**3*EJ/c1*U(k,1)+T(k,1);
b2=k**3*EJ/c1*T(k,1)+S(k,1);
b3=(k**3*EJ/c1*T(k,1)+S(k,1))*k**3*EJ-c2*(k**3*EJ/c1*S(k,1)+V(k,1));
d1=T(k,1);
d2=S(k,1);
return d1*(a2*b3-a3*b2)-d2*(a1*b3-a3*b1)
elif n==10:
a1=V(k,1);
a2=k**3*EJ*U(k,1)-c2*T(k,1);
a3=k**3*EJ*U(k,1)-c2*T(k,1);
b1=k**3*EJ/c1*U(k,1)+T(k,1);
b2=k**6*E**2*c1*T(k,1)+(1-c2/c1)*k**3*EJ*S(k,1)-c2*V(k,1);
b3=k**6*E**2*c1*T(k,1)+(1-c3/c1)*k**3*EJ*S(k,1)-c3*V(k,1);
d1=T(k,1);
d2=k**3*EJ*S(k,1)-c3*V(k,1);
return d1*(a2*b3-a3*b2)+d2*(a1*b2-a2*b1)

```

Схема 3

```

def y(k,x):# функції для розрахунку форми коливань

if n==1:
return U(k,x)-T(k,1)*V(k,x)/U(k,1)
elif n==2:
return U(k,x)-V(k,1)*V(k,x)/S(k,1)
elif n==3:
return U(k,x)-S(k,1)*V(k,x)/T(k,1)
elif n==4:
return k**3*EJ*S(k,x)/c-(T(k,x)/V(k,1))*(k**3*EJ*U(k,1)/c+T(k,1))+V(k,x)
elif n==5:
return k**3*EJ*S(k,x)/c-(T(k,x)/V(k,1))*(k**3*EJ*U(k,1)/c+T(k,1))+V(k,x)
elif n==6:
a1=U(k,1);
a3=k**3*EJ*V(k,1)-c*U(k,1);
b1=V(k,1);b2=U(k,1)
b3=k**3*EJ*S(k,1)-c*V(k,1);
d1=V(k,2);
if 0<=x<=l1:
return -b3/a3*U(k,x)+V(k,x)
elif l1<x<=l:
return -b3/a3*U(k,x)+V(k,x)-1/d1*(-b3/a3*a1+b1)*V(k,x-l1)
elif n==7:
a1=S(k,1);
a2=V(k,1);
a3=k**3*EJ*V(k,1)-c*U(k,1);
b3=k**3*EJ*S(k,1)-c*V(k,1);
d2=S(k,2)
if 0<=x<=l1:
return -b3/a3*U(k,x)+V(k,x)
elif l1<x<=l:
return -b3/a3*U(k,x)+V(k,x)-1/d2*(-b3/a3*a2+a1)*V(k,x-l1)
elif n==8:
a1=S(k,1);
a2=k**3*EJ*V(k,1)-c1*U(k,1);
b1=U(k,1);
b2=k**3*EJ*S(k,1)-c1*V(k,1);
d1=T(k,2);
if 0<=x<=l1:
return -b2/a2*U(k,x)+V(k,x)
elif l1<x<=l:
return -b2/a2*U(k,x)+V(k,x)-1/d1*(-b2/a2*a1+b1)*V(k,x-l1)
elif n==9:
a1=V(k,1);
a3=k**3*EJ*U(k,1)-c2*T(k,1);
b1=k**3*EJ/c1*U(k,1)+T(k,1);
b3=(k**3*EJ/c1*T(k,1)+S(k,1))*k**3*EJ-c2*(k**3*EJ/c1*S(k,1)+V(k,1));
d1=T(k,2);
if 0<=x<=l1:
return -b3/a3*T(k,x)+k**3*EJ/c1*S(k,x)+V(k,x)
elif l1<x<=l:
return -b3/a3*T(k,x)+k**3*EJ/c1*S(k,x)+V(k,x)-1/d1*(b1-a1*b3/a3)*V(k,x-l1)
elif n==10:
a1=V(k,1);
a2=k**3*EJ*U(k,1)-c2*T(k,1);
b1=k**3*EJ/c1*U(k,1)+T(k,1);
b2=k**6*E**2*J**2/c1*T(k,1)+(1-c2/c1)*k**3*EJ*S(k,1)-c2*V(k,1);
d1=T(k,2);
if 0<=x<=l1:
return -b2/a2*T(k,x)+k**3*EJ/c1*S(k,x)+V(k,x)
elif l1<x<=l:
return -b2/a2*T(k,x)+k**3*EJ/c1*S(k,x)+V(k,x)-1/d1*(b1-a1*b2/a2)*V(k,x-l1)

```

Схема 4

```

d=[]
w=0
for i in range(0,4+w):# перебор k
k=brentq(lambda k:f(k),0+pi*i,pi+pi*i)# числове визначення k
if k==0:# виключення нульового значення k
w=1
elif k!=0:
p=round(k,3)
if p not in d:
d.append(p)

```

Схема 5

```

q=linspace(0,1,100)
x=[w for w in q]
for k in d:
w=round((k**2*(EJ/m)**0.5)/(2*pi*L**2),3)
z=[y(k,x)for x in q]
plt.plot(x,z,label='k=%s,f=%s Гц'%(str(k),str(w)))
plt.title('Перші три форми вигибних коливань у вісьовій лінії труби для компоновки № %s'%n)
plt.xlabel('x/L')
plt.ylabel('Y(x/L)')
plt.legend(loc='best')
plt.grid(True)plt.show()
plt.show()

```

Схема 6

Таблиця 2

#### Експериментальна перевірка точності визначення частот

Номер власної частоти	Експериментальне значення, Гц	Розраховане значення, Гц	Похибка розрахунку, %
Перша форма	66,6	67,8	1,2
Друга форма	132,1	134,3	2,2
Третя форма	284,2	290,1	5,9

ня у вигляді програмних функцій  $\text{defS}(k,x)$  з передачею в них змінних  $k, x$  (схема 2).

3. Отримуємо функції для визначення коефіцієнта форми коливань  $k$  відповідно до номерів компонок  $n$  від 1 до 10 (схема 3).

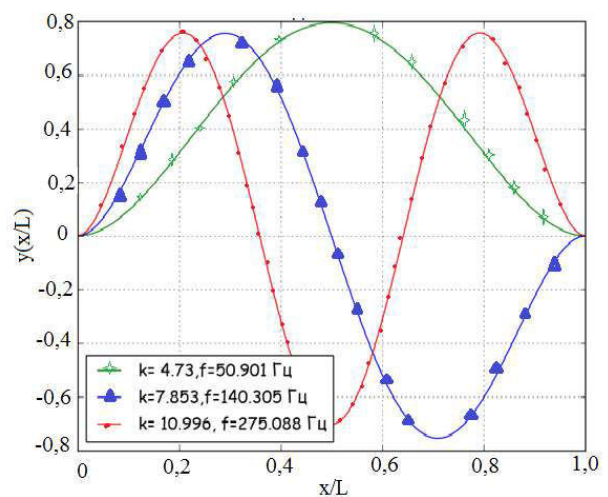
4. Отримуємо функції для визначення форми коливань  $y(x)$  відповідно до номерами компонок  $n$  від 1 до 10 (схема 4).

5. Знаходимо чисельні значення перших трьох коефіцієнтів форми  $k$  виключаючи при цьому його нульове значення. При цьому вирішуємо проблему області пошуку для  $k$  шляхом використання діапазону  $0+\pi i, \pi+\pi i$  (схема 5).

6. Будуємо на одному графіку усі три форми коливань з обчисленими частотами (схема 6).

З використанням розробленого програмного забезпечення визначимо форми коливань трубопроводу для випадку, коли трубопровід закріплений на двох пружних опорах щодо поперечних переміщень на кінцях. Користуючись наведеною методикою, реалізованою в розробленій програмі, отримаємо візуалізацію частоти і фор-

ми головних коливань для вказаної компоновки ділянки трубопроводу у відповідності до рівнянь розрахунку частоти та форми головних



Візуалізація перших трьох форм вигибних коливань вісьової лінії трубопроводу

коливань (рисунок).

Експериментальна перевірка точності визначення частот проводилась з використанням ВД з циліндричним резонатором [10]. Результати порівняльного аналізу наведені в табл. 2.

Помітно, що похибка зростає зі зростанням форми, однак значення похибки визначення частоти коливання на першій формі є переконливим аргументом для використання розробленої аналітичної моделі. Для інших форм похибка в межах допустимого (5%) з урахуванням того що розрахунок не враховує тертя і вплив швидкості потоку [10].

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Демпфирование параметрических колебаний трубопровода / Ишемгузин И.Е. и др. // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2011. – №. 3. – С.84-93.
2. Гоцуленко В.В. Самовозбуждающиеся автоколебания в вертикальных трубах, включающих элемент с распределенными параметрами, при конвективном теплоподводе // Металургия (Наукові праці ЗДІА). – Запоріжжя: РВВ ЗДІА. – 2009. – Вип.20. – С.1-6.
3. Валиев М.И., Жолобов В.В., Тарновский Е.И. К расчету напряжений стенки трубы линейной части магистрального трубопровода в области параметрического резонанса / Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2014. – №. 4. – С.31-39.
4. Макарьянц Г.М., Прокофьев А.Б., Шахматов Е.В. Использование численных методов при моделировании собственных колебаний трубопроводных систем // Сборник трудов третьей конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEMGmbH. – М.: Полигон-пресс. – 2003. – С.401-408.
5. Прокофьев А.Б. Расчет собственных частот и форм колебаний трубопроводов с помощью программного комплекса // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 1999. – Т.1. – №. 2. – С.23-31.
6. Рукавишников В.А., Ткаченко О.П. Численное и асимптотическое решение уравнений распространения гидроупругих колебаний в изогнутом трубопроводе // Прикладная механика и техническая физика. – 2000. – Т.41. – №. 6. – С.161-169.
7. Popkov A.Y., Kuzmichev I.K. Open Resonator with Fragment of Circular Waveguide: Model Computation and Experiment // Radio Physics and Radio Astronomy. – 2012. – Vol.14. – №. 4. – P.425.
8. Leissa A.W. The historical bases of the Rayleigh and Ritz methods // Journal of Sound and Vibration. – 2005. – Vol.287. – №. 4-5. – С.961-978.
9. Li F.M., Kishimoto K., Huang W.H. The calculations of natural frequencies and forced vibration responses of conical shell using the Rayleigh–Ritz method // Mechanics Research Communications. – 2009. – Vol.36. – №. 5. – P.595-602.
10. Theoretical Basis for Fused-Quartz Resonator Flow Tube Design. / Y.K. Taranenko, O.Y. Oliynyk, N.A. Minakova, O.V. Titova // Measurement Techniques. – 2018. – № 61 (3). – P.314-320.

Надійшла до редакції 18.05.2019

## РАЗРАБОТКА АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ЗАГРУЗКИ ТРУБОПРОВОДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Олейник О.Ю., Тараненко Ю.К.

Статья посвящена разработке аналитической для расчета и оптимизации виброакустического нагружения трубопроводов технологических аппаратов. Отклонение параметров геометрии трубопровода от идеальных и неоднородность материала влияют на виброакустический нагружения технологических аппаратов. Существующие многочисленные алгоритмы расчетов частот и форм колебаний технологических трубопроводов, используемых для оценки основной частоты колебательной системы не учитывают динамические характеристики. Точность частоты колебаний определения виброакустического нагружения зависит от выбора формы колебаний, которую иногда трудно заранее предсказать. Практические задачи требуют выполнения расчетных работ с требуемой точностью. Отсутствие точного метода расчета частот и форм колебаний трубопроводов, который бы учитывал тип крепления и расположения сопротивление, проектировщики вынуждены адаптировать существующие подходы и модели расчетов к конкретным измерительным условиям. Поэтому на практике применяют упрощенные и приближенные методы расчета. При наличии сосредоточенных масс и в случае учета рассеяния энергии в местах крепления трубопроводов алгоритмы расчета становятся более трудоемкими. В некоторых случаях возможность математической трактовки задача становится выполнимой только при условии введения в расчет некоторых упрощений. Предложенная аналитическая модель расчета частот и форм колебаний виброакустического нагружения базируется на методе Крылова. Определение собственных форм и частот колебаний трубопровода осуществляется интеграцией исходного дифференциального уравнения свободных поперечных колебаний для различных типов закрепления концов. Приведенные результаты программной реализации модели в программной среде Python.

**Ключевые слова:** виброакустический метод контроля, частота, форма колебаний, функции Крылова.

## DEVELOPMENT OF AN ANALYTICAL MODEL FOR CALCULATING AND OPTIMIZING VIBROACOUSTIC LOADING OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT PIPELINES

Oliynyk O., Taranenko Y.

Ukrainian State Chemical Technological University, Dnipro, Ukraine

The article is devoted to the development of analytical model for calculation and optimization of vibroacoustic load of pipelines of technological apparatuses. A deviation of pipeline geometry from the ideal one and the heterogeneity of material affect the vibroacoustic load of a technological apparatus. Numerous existing algorithms for calculating frequencies and forms of fluctuations in technological pipelines used to estimate the fundamental frequency of a vibrational system do not take into account dynamic characteristics. An accuracy of an oscillation frequency of determining the vibration acoustic load depends on the choice of the form of oscillation, which is sometimes difficult to predict in advance. Practical tasks require performing design work with a required accuracy. The lack of an accurate method for calculating frequencies and forms of fluctuations in pipelines, which would take into account a type of fastening and a location of resistance, forces designers to adapt existing approaches and models of calculations to specific measuring conditions. Therefore, in practice, simplified and approximate methods of calculation are used. In the presence of concentrated masses and in the case of energy scattering registration in places where pipelines are fastened, calculation algorithms become more labor intensive. In some cases, a possibility of mathematical interpretation of a task becomes feasible only if some simplifications are introduced. The proposed analytical model for calculation of frequencies and forms of vibroacoustic load oscillations is based on the Krylov method. The determination of eigenforms and frequencies of vibrations of a pipeline is carried out by integrating an initial differential equation of free transverse oscillations for various types of fastening of the ends. The results of the software implementation of the model in the Python software environment are shown.

**Ключові слова:** vibration frequency control method, frequency, waveform, Krylov function.

## REFERENCES

1. Ishemgulin I. E. *Dempfirovaniye parametricheskikh kolebaniy truboprovoda* [Damping of parametric oscillations of the pipeline]. *Setevoye izdaniye «Neftegazovoye delo»*, 2011, no. 3, pp.84-93. (in Russian).
2. Hotsulenko V. V. *Samovozbuzhdayushchyesya avtokolebaniya v vertykalnykh trubakh, vklyuchayushchyykh ÷lement s raspredelennymy parametramy, pry konvektivnom teplopodvode*, *Metallurhiya* [Self-excited auto-oscillations in vertical pipes, including an element with distributed parameters, with convective heat supply]. *Naukovi pratsi ZDIA*, 2009, vol. 20, pp.1-6. (in Russian).
3. Valiyev M. I., Zholobov V. V., Tarnovskiy Ye. I. *K raschetu napryazheniy stenki truby lineynoy chasti magistral'nogo truboprovoda v oblasti parametricheskogo rezonansa* [To the calculation of pipe wall stresses in the linear part of the main pipeline in the field of parametric resonance]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov*, 2014, no. 4, pp.31-39. (in Russian).
4. Makar'yants G. M., Prokof'yev A. B., Shakhmatov Ye. V. *Ispol'zovaniye chislennykh metodov pri modelirovanii sobstvennykh kolebaniy truboprovodnykh sistem* [Using numerical methods for modeling natural oscillations of pipeline systems]. In *Sbornik trudov tret'yey konferentsii pol'zovateley programmno obespecheniya CAD-FEM GmbH*. M.: Poligon-press, 2003, pp.401-408. (in Russian).
5. Prokof'yev A. B. *Raschet sobstvennykh chastot i form kolebaniy truboprovodov s pomoshch'yu programmno kompleksa* [Calculation of Natural Frequencies and Oscillation Types of Pipelines Using a Software Package]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo sentra Rossiyskoy akademii nauk*, 1999, vol. 1, no. 2, pp.23-31. (in Russian).
6. Rukavishnikov V. A., Tkachenko O. P. *Chislennoye i asimptoticheskoye resheniye uravneniy rasprostraneniya gidrouprugikh kolebaniy v izognutom truboprovode* [Numerical and Asymptotic Solution of the Equations of Propagation of Hydroelastic Oscillations in a Bent Pipeline]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2000, vol. 41, no. 6, pp.161-169. (in Russian).
7. Popkov A. Y., Kuzmichev I. K. *Open Resonator with Fragment of Circular Waveguide: Model Computation and Experiment*. *Radio Physics and Radio Astronomy*, 2012, vol. 14, no. 4, pp.425.
8. Leissa A. W. *The historical bases of the Rayleigh and Ritz methods*. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, vol. 287, no. 4-5, pp.961-978.
9. Li F. M., Kishimoto K., Huang W. H. *The calculations of natural frequencies and forced vibration responses of conical shell using the Rayleigh-Ritz method*. *Mechanics Research Communications*, 2009, vol. 36, no. 5, pp 595-602.
10. Taranenko Y. K., Oliynyk O. Y., Minakova N. A., Titova O. V. *Theoretical Basis for Fused-Quartz Resonator Flow Tube Design*. *Measurement Techniques*, 2018, no 61(3), pp.314-320.



УДК 519.237: 656.025

*Писарькова В.Р., Науменко Н.Ю.***ПІДХОДИ КЛАСТЕРНОГО АНАЛІЗУ ДО ОЦІНКИ ФІНАНСОВО-ЕКОНОМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ПІДПРИЄМСТВ****ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, Україна**

Стаття присвячена фінансово-економічному оцінюванню стану автотранспортних підприємств України шляхом використання багатовимірного статистичного кластерного аналізу. В статті було розв'язано задачу аналізу фінансово-економічного стану підприємств України за 2013–2017 рр. у пакеті STATISTICA з урахуванням фінансово-економічних показників. У дослідженні застосовано чотири групи показників: ліквідність, фінансова стійкість, ділова активність, рентабельність за даними фінансової звітності десяти автотранспортних підприємств. Використання методу *k*-середніх та агломеративного методу деревоподібної кластеризації дозволило розділити підприємства на три кластери, які відображають їх стан: кризовий, передкризовий, некризовий. При застосуванні методу *k*-середніх методом сортування відстані та вибору спостереження на постійних інтервалах задано початкові центри кластерів, вибрано спостереження, які максимізують початкові відстані між кластерами. Отримано значення міжгрупових і середньогрупових дисперсій, параметра *F* та рівня значущості, що дозволило виявити фінансово-економічні показники, які несуть найбільшу інформативність для процесу кластеризації методом *k*-середніх. Для кластеризації агломеративним методом деревоподібної кластеризації у якості правила об'єднання в кластери взято метод одиночного зв'язку. В результаті кластеризації побудовано дендрограму, яка дозволяє визначити кластери в залежності від відстані між ними. Це дозволило розглянути характеристику різних сторін фінансового стану підприємства, виявити які параметри утворюють початкові кластери стану підприємств, та які утворюють окремі кластери і поступово приєднуються до перших кластерів. Побудована горизонтальна деревоподібна діаграма автотранспортних підприємств відображає підприємства, які тісно стискаються один з одним та шляхом об'єднання формують нові кластери. Отримані кластери шляхом кластеризації методом *k*-середніх та агломеративним методом деревоподібної кластеризації було проаналізовано та зроблено висновки щодо їх стану.

**Ключові слова:** кластерний аналіз, метод *k*-середніх, агломеративний метод деревоподібної кластеризації, фінансово-економічний стан підприємств, стан підприємств.

**DOI:** 10.32434/2521-6406-2019-5-1-63-69

***Постановка проблеми***

За умов інтеграції та глобалізації ключове значення у розв'язанні проблем зростання конкурентоспроможності національної економіки мають сучасні організаційні утворення, а саме: наукові і технологічні парки, технополіси, інноваційні та науково-технологічні центри, бізнес-інкубатори, кластери. Адже, господарська глобалізація значно послаблює національні бар'єри, сприяючи уніфікації бізнесу і за даних умов

регіонально-просторові системи є головними суб'єктами господарювання як в межах країни, так і в глобальному середовищі [1].

Аналіз фінансового стану підприємства є важливою і актуальною проблемою, як для кожного підприємства, так і для держави в цілому. Раніше при аналізі стану підприємства вводилися різного роду ліміти, фонди, і з головних показників виділяли прибуток. Цей показник був основою щодо висновків про фінансовий стан

підприємства.

В даний час такий підхід неможливий, так як кожне підприємство в умовах ринкових відносин зацікавлене в стабільності, платоспроможності, можливості економічного зростання, в сучасних методах оцінювання та аналізу. У зв'язку з цим важливо вже не стільки враховувати розмір прибутку, скільки визначати рівень платоспроможності, фінансову стійкість, ділову активність, рентабельність.

Застосовувані в Україні методи аналізу фінансово-економічного стану підприємства відстають від розвитку ринкової економіки. Багато питань і проблеми такі, як оцінка стану підприємства методами сучасного багатовимірного статистичного аналізу досліджені з недостатньою повнотою.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Поняття «кластер» характеризується значною кількістю підходів до розуміння його сутності, економічного змісту і пояснення з точки зору інституційної теорії. Розгляду кластерів присвячені роботи: В. Агафонова, М. Афанасьєва, А. Буряка, Є. Безвушко, Н. Власової, М. Войнаренко, А. Воронова, Д. Грушевського, В. Дубницького, Р. Качалова, Г. Клейнера, А. Кудінова, Ю. Лаврикова, І. Пістунова, Е. Монастирною, Н. Нагрудної, С. Осадчука, В. Осипова, І. Пилипенко, О. Романової, С. Соколенко, В. Чевганова, О. Юданова та ін.

#### **Мета і постановка задачі дослідження**

Метою дослідження є застосування багатовимірного статистичного кластерного аналізу для фінансово-економічного оцінювання стану автотранспортних підприємств України.

#### **Вклад основного матеріалу дослідження**

Кластеризація, в загальному вигляді, визначається як процес сумісного розташування фірм і інших дійових осіб усередині концентрованої географічної області, кооперації навколо певної функціональної ніші і встановлення тісних взаємозв'язків і робочих альянсів для посилення їх колективної конкурентоспроможності [2].

Кластерний аналіз – це загальна назва безлічі обчислювальних процедур, що використовуються при створенні класифікації. Більш точно, кластерний метод – це багатовимірний статистичний метод, що виконує збір даних, які містять інформацію про вибірку об'єктів, а потім впорядковує об'єкти в порівняно однорідні групи.

Одне з важливих призначень кластеризації – підвищення конкурентоспроможності кожної

компанії, яка входить в кластер, підвищення конкурентоспроможності виробництва і стійкого функціонування елементів всієї системи. Частка кінцевої продукції в загальному обсязі продажів аналогічної продукції – головний показник конкурентоспроможності [3].

Для об'єднання об'єктів в кластери необхідно мати в розпорядженні міру подібності між об'єктами. Те, що деякі речі виявляють між собою подібність або відмінність, є вельми важливим моментом для процесу класифікації. Принцип поетапного методу розбиття вибірки на окремі групи досить простий. Однак, незважаючи на простоту, поняття подібності і особливо процедури, які використовуються при вимірюванні подібності, не такі прості. Не існує ні однієї загальноприйнятої для використання міри схожості. Найбільш поширеними підходами є: коефіцієнти кореляції, методи відстані, коефіцієнти асоціативності, імовірнісні коефіцієнти подібності.

За допомогою різних методів кластеризації можна отримати різні результати для одних і тих самих вихідних даних. Деякі методи мають особливості і властивості, що не притаманні іншим методам. Наприклад, метод одиночного зв'язку має тенденцію до утворення довгих ланцюгів кластерів, в той час як метод Уорда схильний до утворення щільних гіперсферичних кластерів. Розуміння того, що різні методи кластеризації будуть породжувати різні результати, має більш ніж просто академічний інтерес, оскільки ці методи застосовуються до дослідження реальних даних без особливих роздумів. Краще ще до вичерпного аналізу даних знати сильні і слабкі сторони різних методів, ніж раптово виявити, що результати аналізу багато в чому зобов'язані властивостям самого методу, а не внутрішній структурі даних.

Головне призначення кластерного аналізу (від англ. Cluster – гроно, скупчення) – розбиття множини досліджуваних об'єктів і ознак на однорідні в деякому сенсі групи або кластери [4]. Методи кластерного аналізу можна застосовувати навіть тоді, коли мова йде про просте угруповання, в якому все зводиться до утворення груп по кількісній подібності.

Для проведення кластерного аналізу для автотранспортних підприємств застосовано метод k-середніх. Метод k-середніх – це метод кластерного аналізу, мета якого полягає в розподіленні m спостережень (з простору  $R^n$ ) на k кластерів, при цьому кожне спостереження відноситься до того кластеру, до центру якого

воно найближче.

В якості міри близькості використовується Евклідова відстань (1):

$$\rho(x, y) = \|x - y\| = \sqrt{\sum_{p=1}^n (x_p - y_p)^2},$$

де  $x, y \in \mathbb{R}^n$ . (1)

Розглянемо низку спостережень  $(x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(m)})$ ,  $x^{(i)} \in \mathbb{R}^n$ .

Метод k-середніх поділяє m спостережень на k кластерів ( $k \leq m$ )  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$ , щоб мінімізувати сумарне квадратичне відхилення точок кластерів від центрів цих кластерів (2):

$$\min \left[ \sum_{i=1}^k \sum_{x^{(j)} \in S_i} \|x^{(j)} - \mu_i\|^2 \right],$$

де  $x^{(j)} \in \mathbb{R}^n$ ,  $\mu_i \in \mathbb{R}^n$ , (2)

де  $\mu_i$  – центр кластера  $S_i$ .

Якщо міра близькості до центру кластера визначена, то розбиття об'єктів на кластери зводиться до визначення центрів кластерів. Число кластерів k задається заздалегідь.

Розглянемо початковий набір k середніх (центрів)  $\mu_1, \dots, \mu_k$  у кластерах  $S_1, S_2, \dots, S_k$ . На першому етапі центри кластерів обираються випадково або за певним правилом (наприклад, обрати центри, які максимізують початкові відстані між кластерами).

Відносимо спостереження до тих кластерів, чиє середнє (центр) до них найближче. Кожне спостереження належить тільки до одного кластера, навіть якщо його можна віднести до двох або більше кластерів.

Після цього, центр кожного i-го кластера перераховується за наступним правилом (3):

$$\mu_j = \frac{1}{S_i} \sum_{x^{(j)} \in S_i} x^{(j)}. \quad (3)$$

Таким чином алгоритм k-середніх полягає у перерахунку на кожному кроці центру для кожного кластера, отриманого на попередньому кроці. Алгоритм зупиняється, коли значення  $m_i$  не змінюються:  $\mu_i^{\text{крок } t} = \mu_i^{\text{крок } t+1}$ .

На основі даних бухгалтерського балансу за 5 років діяльності для кластерного аналізу розраховано фінансово-економічні показники для десяти автотранспортних підприємств України, а саме: ПП «Автоекспрес-Дніпро»,

ПАТ «АТП-11210», ПАТ «Терни-АВТО», ПАТ «Північтранс», ПАТ «Укрбуд», ПРАТ «Черкасиавтотранс», ПРАТ «Закарпатавтотранс», ПРАТ «Поділля-Плюс», ТОВ «ВОСТОК», ПАТ «Дніпропетровське автотранспортне підприємство 11201»).

Інформаційним забезпеченням виступили наступні кількісні фінансові показники: коефіцієнт загальної ліквідності (L1), коефіцієнт абсолютної ліквідності (L2), коефіцієнт поточної ліквідності (L3), коефіцієнт незалежності (F1), коефіцієнт фінансової залежності (F2), коефіцієнт забезпеченості власними оборотними запасами (F3), коефіцієнт фінансування (F4), оборотність дебіторської заборгованості (D1), оборотність кредиторської заборгованості (D2), оборотність власного капіталу (D3). На основі розрахованих показників та їх оптимальних значень було зроблено висновок щодо стану підприємств.

Для розв'язання задачі аналізу фінансово-економічного стану підприємств за допомогою кластерного аналізу використано програмний продукт STATISTICA. У програмі реалізовані так звані агломеративні методи мінімальної дисперсії: joining (tree clustering) (деревоподібна кластеризація) і two-way joining (двовходова кластеризація), метод k-means (k-середніх).

У результаті, кластеризація підприємств розподілить їх на кризові, передкризові та некризові підприємства, тобто, кількість кластерів буде дорівнювати трьом. Початкові центри кластерів задано методом сортування відстані та вибору спостереження на постійних інтервалах. Для встановлення початкових центрів кластерів обрано спостереження, які максимізують початкові відстані між кластерами, при побудові кластерів задається максимальна кількість ітерацій.

Результати кластеризації методом k-середніх наведені у таблиці. В ній приведені значення міжгрупових та середньогрупових дисперсій. Чим менше значення середньогрупової дисперсії та чим більше значення міжгрупової дисперсії, тим краще ознака характеризує приналежність об'єктів до кластера.

Кращий результат кластеризації характеризується більшими значеннями параметра F та меншими значеннями параметра signif. p (рівень значущості). Параметри з рівнем значущості  $p > 0,05$  можна виключити з дослідження.

Такі показники як F2 (коефіцієнт забезпеченості власними оборотними засобами), F4 (коефіцієнт фінансування), D1 (оборотність дебіторської заборгованості) та D2 (оборотність

## Результати кластеризації методом k-середніх

Показник	Дисперсія		F	signif. p (рівень значущості)
	Міжгрупова	Середньогрупова		
L1	1,65	121,12	0,32	0,73
L2	0,72	17,71	0,96	0,39
L3	0,01	59,61	0,00	1,00
F1	0,51	30,94	0,39	0,68
F2	907,33	800,28	26,64	0,00
F3	6,29	102,97	1,44	0,25
F4	903,73	725,59	29,27	0,00
D1	1068,45	1172,26	21,42	0,00
D2	915,15	447,00	48,11	0,00
D3	31,90	263,64	2,84	0,07
D4	1,72	77,10	0,52	0,60
R1	0,09	3,72	0,55	0,58
R2	0,01	0,62	0,54	0,59
R3	0,60	2,43	5,83	0,01
R5	0,28	4,60	1,41	0,25

кредиторської заборгованості) несуть найбільшу інформативність для процесу кластеризації. Для швидкого розгляду стану підприємств буде достатньо розглянути саме ці показники.

Середні значення для сформованих кластерів наведені на рис. 1.

Графік передбачає 3 кластери, середні значення яких відрізняються один від одного. Кожна ламана лінія на лінійному графіку відповідає одному з отриманих кластерів. Кожний розподіл горизонтальної осі графіка відповідає одній із змінних, які включені в аналіз. Вертикальна вісь відповідає середнім значенням змінних для об'єктів, що входять в кожен з кластерів. З рис. 1 видно, що збіги присутні в більшій кількості параметрів.

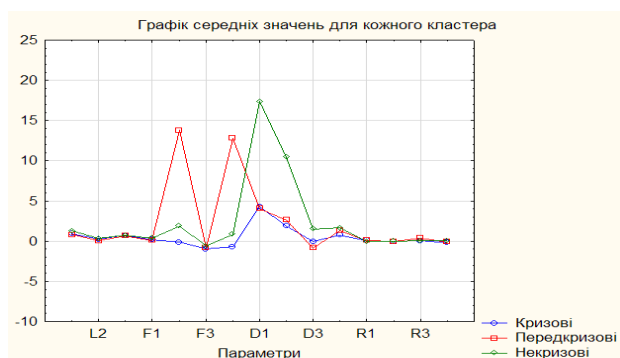


Рис. 1. Лінійний графік середніх значень сформованих кластерів

Аналізуючи отримані результати, отримано наступне оцінювання стану підприємств. Перший кластер передбачає кризові підприємства,

до цього кластера потрапили наступні транспортні підприємства: «АТП-11210», «Терни-АВТО», «Північтранс» за 2016 та 2017 роки діяльності, «Укрбуд», «Закарпатавто-транс», «Поділля-Плюс» за показниками 2017 року, «ВОСТОК» та «Дніпропетровське автотранспортне підприємство 11201».

До передкризових підприємств, тобто до другого кластера, потрапили підприємства: «Автоекспрес-Дніпро» за показниками 2014 року, «Північтранс» за 2013–2015 роки діяльності, «Поділля-Плюс» з фінансово-економічними показниками 2015 року.

Третій кластер налічує наступні підприємства: «Автоекспрес-Дніпро», а саме 2015–2017 рр. діяльності, «Черкасиавтотранс» та «Поділля-Плюс» за показниками за 2013 та 2016 роки. Це означає, що ці підприємства відносяться до некризових підприємств.

Важливим моментом при кластеризації об'єктів є визначення відстані між кластерами. На першому кроці ієрархічної агломеративної процедури, коли кожний об'єкт є окремим кластером, відстані між цими об'єктами визначаються обраною мірою. Однак, коли зв'язуються разом декілька об'єктів, виникає проблема визначення відстані між кластерами, тобто необхідне правило об'єднання або зв'язку для двох кластерів. Існує безліч методів об'єднання кластерів: відстань «найближчого сусіда» (одиничний зв'язок), відстань «дальнього сусіда» (повний зв'язок), незважене та зважене попарне середнє (середній зв'язок), незважений та зважений центроїдний методи, метод Уорда [5].

При кластеризації агломеративним методом

деревоподібної кластеризації у якості правила ієрархічного об'єднання в кластери використовується метод одиночного зв'язку.

В результаті кластеризації будується горизонтальна або вертикальна дендрограма – графік, на якому визначені відстані між об'єктами і кластерами при їх послідовному об'єднанні. Деревоподібна структура графіка дозволяє визначити кластери в залежності від обраного порога – заданої відстані між кластерами.

З рис. 2 видно, що перший кластер утворюють найбільш схожі параметри: загальна рентабельність (R1) і рентабельність продукції (R4), другий кластер утворюють швидкий коефіцієнт ліквідності (L1) і поточний коефіцієнт ліквідності (L3). Всі інші коефіцієнти характеризують різні сторони фінансового стану підприємства, утворюють окремі кластери і поступово приєднуються до перших кластерів.

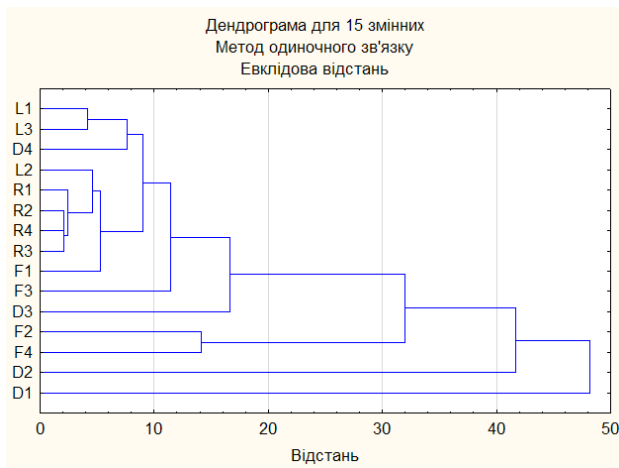


Рис. 2. Горизонтальна деревоподібна діаграма ознак підприємств

Вибір кількості класів для дендрограми для підприємств при методі одиночного зв'язку може визначатися на основі аналізу спеціальних функціоналів якості, на основі порівняння розбиття на різну кількість класів, можливості змістовної інтерпретації та інших критеріїв. Найбільш доцільну розбивку вибирає найчастіше сам дослідник за дендрограмою, що відображає результати групування об'єктів на всіх кроках алгоритму. Одночасно можуть також використовуватися і математичні критерії якості групування [6].

Діаграму станів підприємств надано на рис. 3, де видно, що залежно від відстані, підприємства потрапили до одного з можливих

кластерів.

Діаграма починається зліва з кожного підприємства в своєму власному кластері. При русі вправо, транспортні підприємства, які більш тісно стискаються один з одним, об'єднуються і формують нові кластери. Кожен вузол діаграми, наведеної на рис. 3, становить об'єднання двох або більше кластерів, положення вузлів на горизонтальній осі визначає відстань, на якій були об'єднані відповідні кластери.

Після здійснення деревоподібної кластеризації, до кластера некризових підприємств потрапили наступні підприємства: «Автоекспрес-Дніпро» за 2017 та 2016 рр., «Черкасиавтотранс» за 2013 та 2017 роки діяльності, «АТП-11210» за 2014–2017 роки діяльності, «Укрбуд» з показниками 2013, 2014, 2016 та 2017 років, «Закарпаттавтотранс» за 2013–2014 роки діяльності, «Дніпропетровське автотранспортне підприємство 11201».

До кластера кризових підприємств потрапили: «АТП-11210» за 2013 рік, «Дніпропетровське автотранспортне підприємство 11201» за 2013–2014 роки діяльності, «Закарпаттавтотранс» за 2015–2017 роки, «Терни-АВТО», «Поділля-Плюс», «ВОСТОК», та «Північтранс» за 2016 та 2017 роки діяльності.

Останній кластер передбачає передкризові автотранспортні підприємства, а саме: «Черкасиавтотранс» з фінансово-економічними показниками за період 2014–2016 рр., «Поділля-Плюс» за 2015–2017 рр., «Автоекспрес-Дніпро» за 2014–2015 роки діяльності та «Північтранс» за 2013–2015 роки діяльності підприємства.

Результат аналізу дозволив розбити об'єкти дослідження на три групи: кризові, передкризові та некризові підприємства. Кластерний аналіз фінансово-економічних показників об'єктів дослідження показав, що саме показники ділової активності та фінансової стійкості серед усіх 15 розглянутих можуть характеризувати підприємство та віднести його до певного кластера. Про це говорять результати кластеризації шляхом методу k-середніх.

#### Висновки

Кластерний аналіз є потужним засобом розвідувального аналізу даних і статистичних досліджень в будь-якій предметній області. У програмі STATISTICA реалізовані як ієрархічні, так і структурні методи кластерного аналізу. Переваги цього статистичного пакету обумовлені їх графічними можливостями. Передбачені двовимірні і тривимірні графічні відображення отриманих кластерів в просторі досліджуваних

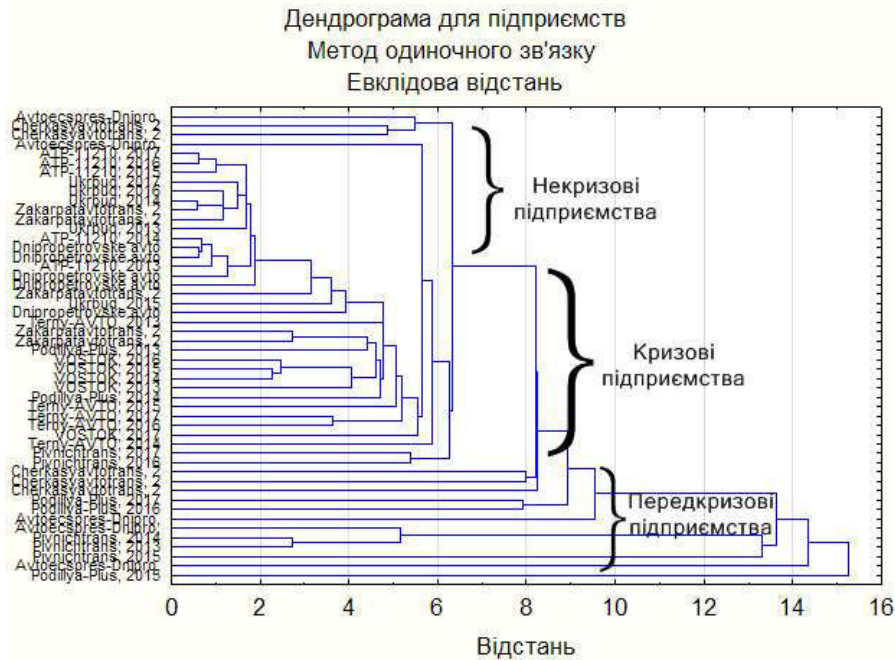


Рис. 3. Горизонтальна деревоподібна діаграма автотранспортних підприємств

змінних, а також результати роботи ієрархічної процедури групування об'єктів.

Необхідно застосовувати різні алгоритми кластерного аналізу і робити висновки на підставі загальної оцінки результатів роботи алгоритмів. Кластерний аналіз дозволяє виявити проблемні ситуації і намітити шляхи їх вирішення. Отже, цей метод непараметричної статистики можна розглядати як складову частину системного аналізу.

Таким чином, при дослідженні стану підприємств кластерна модель не дає для окремо взятого підприємства повну адекватне оцінювання його стану, так як не є репрезентативною та її рекомендується доповнювати нейромережевими моделями оцінки і нечіткими продукційними системами. Така група методів вже є репрезентативною. Тому для найкращого результату фінансового оцінювання підприємства необхідно комплексно використовувати моделі.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Кластери в економіці України: монографія / за наук. ред. докт. екон. наук., проф. М.П. Войнаренка.* – Хмельницький: ХНУ, ФОП Мельник А.А., 2014. – 1085 с.
2. *The Clusters Policies Whitebook / T. Andersson, S. Schwaag-Serger, J. Sörvik, E. Wise.* – Malmö: IKED, 2004. – 250 p.
3. *Dubnytskyi V.I., Naumenko N.Yu., Pysarkova V.R. Methodological approaches to management of industrial clusters // Економічний вісник ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет».* – 2019. – № 1 (9). – С.55-64.
4. *Халафян А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных.* – М.: Бином-Пресс, 2008. – 512 с.
5. *Бурева Н.Н. Многомерный статистический анализ с использованием ПП «STATISTICA»: учеб.-метод. материал по прогр. повыш. квалиф. Применение программных средств в научных исследованиях и преподавании математики и механики.* – Нижний Новгород, 2007. – 112 с.
6. *Пістунов І.М., Антонюк О.П., Турчанінова І.Ю. Кластерний аналіз в економіці: навч. посіб.* – Дніпропетровськ: Нац. гірн. ун-т, 2008. – 84 с.

Надійшла до редакції 15.05.2019

## ПОДХОДЫ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА К ОЦЕНКЕ ФИНАНСОВО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ

**Писарькова В.Р., Науменко Н.Ю.**

Статья посвящена финансово-экономической оценке состояния автотранспортных предприятий Украины путем использования многомерного статистического кластерного анализа. В статье была решена задача анализа финансово-экономического состояния предприятий Украины за 2013–2017 годы деятельности в пакете STATISTICA с учетом финансово-экономических показателей. В исследовании применены четыре группы показателей: ликвидность, финансовая устойчивость, деловая активность, рентабельность по данным финансовой отчетности десяти автотранспортных предприятий. Использование метода *k*-средних и агломеративного метода древовидной кластеризации позволило разделить предприятия на три кластера, которые отражают их состояние: кризисное, предкризисное, некризисное. При применении метода *k*-средних методом сортировки расстояния и выбора наблюдения на постоянных интервалах заданы начальные центры кластеров, выбраны наблюдения, которые максимизируют начальные расстояния между кластерами. Получены значения межгрупповых и среднегрупповых дисперсий, параметра *F* и уровня значимости, что позволило выявить финансово-экономические показатели, которые несут наибольшую информативность для процесса кластеризации методом *k*-средних. Для кластеризации агломеративным методом древовидной кластеризации в качестве правила объединения в кластеры взят метод одиночной связи. В результате кластеризации построено дендрограмму, которая позволяет определить кластеры в зависимости от расстояния между ними. Это позволило рассмотреть характеристику различных сторон финансового состояния предприятия, выявить параметры, образующие начальные кластеры состояния предприятий, и кластеры, которые образуют отдельные кластеры и постепенно присоединяются к первым кластерам. Построена горизонтальная древовидная диаграмма автотранспортных предприятий, которая отражает предприятия, тесно сжимающиеся друг с другом, и путем объединения формирует новые кластеры. Полученные кластеры путем кластеризации методом *k*-средних и агломеративным методом древовидной кластеризации были проанализированы и сделаны выводы относительно их состояния.

**Ключевые слова:** кластерный анализ, метод *k*-средних, агломеративный метод древовидной кластеризации, финансово-экономическое состояние предприятий, состояние предприятий.

## CLUSTER ANALYSIS APPROACHES TO ASSESSING THE FINANCIAL AND ECONOMIC ACTIVITIES OF ENTERPRISES

**Pisarkova V.R., Naumenko N.Yu.**

Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

The article is devoted to the financial and economic assessment of the state of road transport enterprises in Ukraine through the use of multidimensional statistical cluster analysis. The article solved the task of analyzing the financial and economic state of enterprises in Ukraine for 2013–2017 years in the STATISTICA software product, taking into account financial and economic indicators. The study used four groups of indicators: liquidity, financial stability, business activity, profitability according to the financial statements of ten road transport enterprises. The use of the *k*-means method and the agglomerative tree-clustering method made it possible to divide

enterprises into three clusters that reflect their state: crisis, pre-crisis, and non-crisis. When the *k*-means method is used, the initial centers of the clusters are specified by the method of sorting the distance and selecting observations at constant intervals, observations that maximize the initial distances between the clusters are chosen. The value of intergroup and average group variances, the *F* parameter and the level of significance were obtained, which made it possible to identify financial and economic indicators that are most informative for the clustering process using the *k*-means method. For clustering using the agglomerative tree-clustering method, the single link method was taken as the clustering rule. As a result of clustering, a dendrogram was constructed, which allows determining the clusters depending on the distance between them. This made it possible to analyse the characteristics of various aspects of the financial condition of the enterprise, to identify the parameters that form the initial clusters of the state of enterprises, and the clusters, which form separate clusters and gradually join the first clusters. A horizontal tree diagram of road transport enterprises has been built, which reflects enterprises that are closely shrinking with each other and form new clusters by combining. The clusters obtained using the method of *k*-means and agglomerative method of tree clustering were analyzed and conclusions regarding their state were drawn.

**Keywords:** cluster analysis, *k*-means method, agglomerative tree clustering method, financial and economic state of enterprises, state of enterprises.

## REFERENCES

1. Klasteri v ekonomici Ukraïni: monografija [Clusters in the economy of Ukraine: a monograph] / za nauk. red dokt. ekon. nauk., prof. M.P. Vojnarenka. [Clusters in the economy of Ukraine: a monograph / after the scientific release of professor M.P. Vojnarenko]. Hmel'nic'kij, HNU, FOP Mel'nik A.A., 2014, 1085 p. (in Ukrainian).
2. Andersson T., Schwaag-Serger S., Sörvik J., Wise E. The Clusters Policies Whitebook. Malmö, IKED, 2004, 250 p.
3. Dubnytskyi V.I., Naumenko N.Yu., Pysarkova V.R. Methodological approaches to management of industrial clusters // Ekonomichnij visnik DVNZ UDHTU [Economic announcer, DVNZ UDHTU]. Dnipro, 2019, № 1 (9), pp. 55–64. (in Ukrainian).
4. Halafjan A.A. STATISTICA 6. Statisticheskij analiz dannyh [STATISTICA 6. Statistical analysis of data]. Moskva, Binom-Press, 2008, 512 p. (in Russian).
5. Bureeva N.N. Mnogomernyj statisticheskij analiz s ispol'zovaniem PPP «STATISTICA»: ucheb.-metod. material po progr. povysh. kvalif. Primenenie programnyh sredstv v nauchnyh issledovaniyah i prepodavanii matematiki i mehaniki [Multivariate statistical analysis using software «STATISTICA»: educational and methodical material on the advanced training program «Application of software in research and teaching of mathematics and mechanics»]. Nizhnij Novgorod, 2007, 112 p. (in Russian).
6. Pistunov I.M., Antonjuk O.P., Turchaninova I.Ju. Klasterij analiz v ekonomici: navch. posib. [Cluster analysis in economics: tutorial]. Dnipropetrovs'k, Nac. gim. un-t, 2008, 84 p. (in Ukrainian).



УДК 621.926.4

*Титова Е.В., Кравец В.И., Минакова Н.А., Чернецкий Е.В., Гнатко Е.Н.***МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ С ОДНОВРЕМЕННОЙ СУШКОЙ МАТЕРИАЛА В ЦЕНТРОБЕЖНОЙ МЕЛЬНИЦЕ****ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепр, Украина**

В данной работе рассмотрена актуальная задача получения математического описания процесса измельчения материала в центробежной мельнице с одновременной сушкой материала. Исследование процесса сушки с одновременным измельчением показали не только его универсальность при обработке самых разнообразных материалов, но и практически мгновенное удаление большей части влаги. При этом сушка интенсифицируется вследствие не только быстрого развития поверхности контакта, но и активного перемешивания воздуха и материала, а также в результате более быстрого испарения влаги со свежесформированных поверхностей. Измельчение материалов в центробежных мельницах, особенно тонкого помола, сопровождается значительным тепловыделением, что позволяет осуществлять сушку материала одновременно с измельчением. Образование теплоты в рабочих зонах данного типа измельчителей обусловлено следующими факторами: трением воздуха и материала о рабочие элементы, турбулизации пылегазовой смеси, возникновением новых поверхностей при разрушении, многократным сжатием пылегазовой смеси и т.д. Снижение влажности измельченного продукта является необходимым условием для дальнейшего использования в производстве, для чего используют дополнительное сушильное оборудование. С другой стороны, чрезмерное повышение температуры при измельчении для многих материалов нежелательно, так как может привести к ухудшению качества продукта, а также, приводит к созданию взрывоопасной обстановки. Полученная математическая модель позволяет прогнозировать работу измельчителя и определять значения входных величин для получения качественного измельченного продукта с необходимой конечной влажностью. В статье представлен тепловой баланс центробежной мельницы. Приведены математические зависимости для расчета удельного расхода теплоты и температуры пылегазовой смеси на выходе из центробежной мельницы. Получены экспериментальные зависимости по влиянию технологических параметров на температуру пылегазовой смеси, подтверждающие результаты теоретических исследований.

**Ключевые слова:** моделирование процесса измельчения, теплота измельчения, температура пылегазовой смеси, центробежная мельница, уравнение регрессии.

**DOI:** 10.32434/2521-6406-2019-5-1-70-74

***Постановка проблемы и анализ последних исследований и публикаций***

Метод сушки влажных материалов с одновременным измельчением характеризуется высокой интенсивностью процесса, широким диапазоном свойств обрабатываемых материалов, хорошими технико-экономическими показателями. При сушке с одновременным измельчением происходит интенсификация внутреннего

и внешнего теплообмена, причем в этом случае отсутствуют ограничения, присущие большинству сушилок взвешенного слоя, и могут перерабатываться крупнокусковые, комкующиеся и слипающиеся материалы.

Исследование процесса сушки с одновременным измельчением показали не только его универсальность при обработке самых разнообразных материалов, но и практически мгновен-

© Титова Е.В., Кравец В.И., Минакова Н.А., Чернецкий Е.В., Гнатко Е.Н., 2019

*Titova O.V., Kravets V.I., Minakova N.O., Chernetsky E.V., Gnatko O.M.*



ное удаление большей части влаги [1]. При этом сушка интенсифицируется вследствие не только быстрого развития поверхности контакта, но и активного перемешивания воздуха и материала, а также, вероятно, в результате более быстрого испарения влаги со свежесформированных поверхностей. Сравнение различных типов сушилок показало, что сушилки с одновременным измельчением материала имеют преимущества по допустимым температурам газа, времени пребывания, степени перемешивания, занимаемым габаритам.

Измельчение материалов в центробежных мельницах, особенно тонкого помола, сопровождается значительным тепловыделением, что позволяет осуществлять сушку материала одновременно с измельчением [2]. Образование теплоты в рабочих зонах данного типа измельчителей обусловлено следующими факторами: трением воздуха и материала о рабочие элементы, турбулизации пылегазовой смеси, возникновением новых поверхностей при разрушении, многократным сжатием пылегазовой смеси и т.д. Для большого количества материалов снижение влажности является необходимым условием для дальнейшего использования в производстве, для чего используют дополнительное сушильное оборудование. С другой стороны, чрезмерное повышение температуры при измельчении для многих материалов нежелательно, так как в некоторых случаях это приводит к ухудшению качества продукта, а также, приводит к созданию взрывоопасной обстановки.

Таким образом, актуальной проблемой является нахождение математических зависимостей, позволяющих прогнозировать работу измельчителя и определять оптимальные значения входных величин для получения качественного измельченного продукта с необходимой конечной влажностью.

#### Формулировка целей статьи

Задачей исследования является установление математической зависимости между входными и выходными технологическими параметрами процесса измельчения, что позволит расчетным путем определять оптимальные значения параметров в центробежной мельнице.

#### Изложение основного материала исследования

Выполним параметрический анализ центробежной мельницы на основании теплового баланса процесса измельчения.

В мельницу поступает  $G_0$  (кг/с) исходного материала, имеющего температуру  $\Theta_0$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) и начальную влажность  $\omega_0$  (%), из которого испаря-

ется  $W$  (кг/с) влаги. В измельчитель поступает  $L_0$  (кг/с) влажного воздуха с температурой  $t_0$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) и относительной влажностью воздуха  $\varphi_0$ , содержащего  $L$  (кг/с) абсолютно сухого воздуха. Энтальпия воздуха на входе в мельницу –  $I_0$  (Дж/кг). Из мельницы удаляется  $G_2$  (кг/с) высушенного материала с температурой  $\omega_2$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) и конечной влажностью  $\Theta_2$  (%). Воздух, выходящий из мельницы, имеет энтальпию  $I_2$  (Дж/кг) и температуру  $t_2$  ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Получение математической зависимости температуры пылегазовой смеси на выходе измельчителя  $t_2$  от изменения входных параметров выполним аналитическим способом [3].

Общий тепловой баланс процесса выражается зависимостью [4]:

$$\Sigma Q_H = \Sigma Q_K, \quad (1)$$

где  $\Sigma Q_H$  – приход тепла, Вт;  $\Sigma Q_K$  – расход тепла, Вт.

Схема тепловых потоков в мельнице представлена на рис. 1.

Составим уравнение теплового баланса:

$$LI_0 + G_0 C_{\text{вл.м}} \Theta_0 + Q_d = LI_2 + G_2 C_m \Theta_2 + Q_n, \quad (2)$$

где  $C_{\text{вл.м}}$  – теплоемкость влажного материала, Дж/(кг·К);  $Q_d$  – теплота, возникающая в рабочей зоне мельницы при измельчении (теплота измельчения), Вт;  $C_m$  – теплоемкость высушенного материала, Дж/(кг·К);  $Q_n$  – потери теплоты в окружающую среду, Вт.

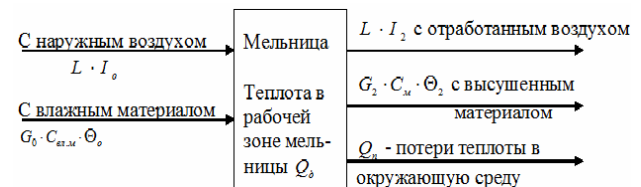


Рис. 1. Схема тепловых потоков в центробежной мельнице

Приход теплоты с влажным материалом представим как сумму двух составляющих: теплоты, приходящей с высушенным материалом, и теплоты, приходящей с удаляемой влагой:

$$G_0 C_{\text{вл.м}} \Theta_0 = G_2 C_m \Theta_0 + W C_{\text{вл.}} \Theta_0. \quad (3)$$

Подставив уравнение (3) в формулу (2), получим:

$$LI_0 + G_2 C_m \Theta_0 + W C_{\text{вл.}} \Theta_0 + Q_d = LI_2 + G_2 C_m \Theta_2 + Q_n. \quad (4)$$

Из уравнения (4) выразим расход теплоты

измельчения  $Q_d$ :

$$Q_d = L(I_2 - I_0) + G_2 C_m (\Theta_2 - \Theta_0) - W C_{вл.} \Theta_0 + Q_n. \quad (5)$$

Расход абсолютно сухого воздуха определим через расход влажного воздуха:

$$L = L_0 (1 - X_0), \quad (6)$$

где  $X_0$  – начальное влагосодержание воздуха, (кг вл./кг сух.мат.).

Расход высушенного материала выразим через расход влажного материала [5]:

$$G_2 = G_0 \frac{(100 - \omega_0)}{(100 - \omega_2)}. \quad (7)$$

Расход удаленной влаги определим по уравнению:

$$W = G_0 \frac{(\omega_0 - \omega_2)}{(100 - \omega_2)}. \quad (8)$$

Конечное влагосодержание воздуха представим в виде:

$$X_2 = X_0 + X_d, \quad (9)$$

где  $X_d$  – дополнительное влагосодержание, которое возникает в результате перехода испаренной влаги в воздух, (кг вл./кг сух.мат.).

Дополнительное влагосодержание определим как отношение расхода удаленной влаги к расходу абсолютно сухого воздуха:

$$\begin{aligned} X_d &= \frac{W}{L} = \frac{W}{L_0 (1 - X_0)} = \\ &= \frac{G_0 (\omega_0 - \omega_2)}{(100 - \omega_2) L_0 (1 - X_0)}. \end{aligned} \quad (10)$$

Начальную энтальпию воздуха определим по уравнению:

$$I_0 = C_{с.в.} t_0 + i_{п.0} X_0, \quad (11)$$

где  $C_{с.в.}$  – теплоемкость сухого воздуха, Дж/(кг·К);  $i_{п.0}$  – начальная энтальпия пара, Дж/кг.

Конечную энтальпию воздуха определим по уравнению:

$$I_2 = C_{с.в.} t_2 + i_{п.2} X_2, \quad (12)$$

где  $i_{п.2}$  – конечная энтальпия пара, Дж/кг.

Потери теплоты представляют собой сложную теплоотдачу от поверхности измельчителя в окружающую среду [6]:

$$Q_n = \alpha F \Delta t, \quad (13)$$

где  $\alpha$  – суммарный коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием и конвекцией, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F$  – площадь поверхности мельницы, м<sup>2</sup>;  $\Delta t$  – разность температур между поверхностью мельницы и окружающей средой, °С.

Суммарный коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием и конвекцией определим по уравнению [5]:

$$\alpha = 9,74 + 0,07 \Delta t. \quad (14)$$

Подставив уравнения (6)–(14) в уравнение (5), получим:

$$\begin{aligned} Q_d &= L_0 (1 - X_0) \times \\ &\times \left[ \left( C_{с.в.} t_2 + i_{п.2} \times \right. \right. \\ &\times \left. \left. \left( X_0 + \frac{G_0 (\omega_0 - \omega_2)}{(100 - \omega_2) L_0 (1 - X_0)} \right) \right) - \right. \\ &\left. - (C_{с.в.} t_0 + i_{п.0} X_0) \right] + \\ &+ G_0 \frac{100 - \omega_0}{100 - \omega_2} C_m (t_2 - t_0) - \\ &- G_0 \frac{(\omega_0 - \omega_2)}{100 - \omega_2} C_{вл.} t_0 + Q_n. \end{aligned} \quad (15)$$

После преобразований получим:

$$\begin{aligned} Q_d &= L_0 (1 - X_0) \left[ C_{с.в.} (t_2 - t_0) + \right. \\ &\left. + X_0 (i_{п.2} - i_{п.0}) \right] + \\ &+ \frac{G}{100 - \omega_2} \left[ (\omega_0 - \omega_2) (i_{п.2} - C_{с.в.} t_0) + \right. \\ &\left. + (100 - \omega_0) C_m (t_2 - t_0) \right] + Q_n. \end{aligned} \quad (16)$$

Разделив обе части уравнения (16) на массовый расход пылегазовой смеси  $M_{см}$  получим удельный расход теплоты измельчения, то есть теплоту измельчения, приходящуюся на 1 кг пылегазовой смеси:

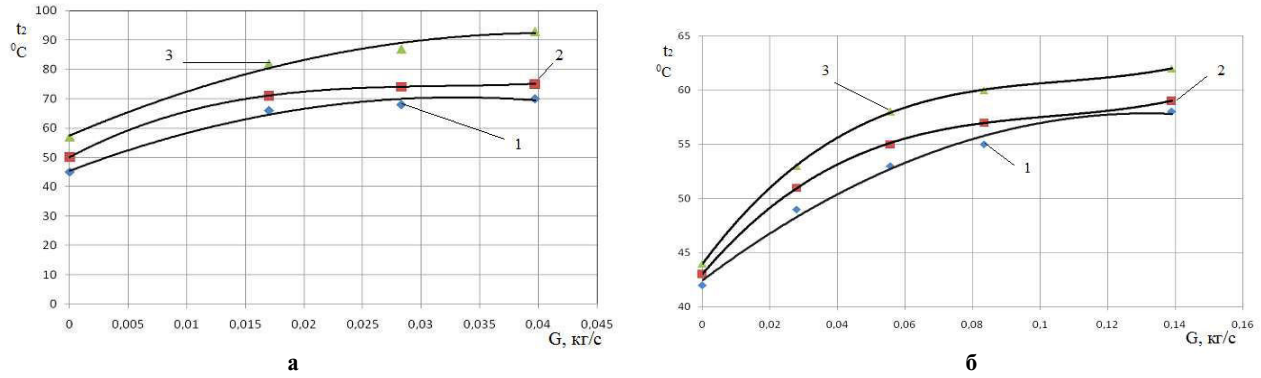


Рис. 2. Зависимость температуры пылегазовой смеси на выходе из мельницы от расхода материала и расхода воздуха при измельчении: а) мрамора: — экспериментальные данные при расходе воздуха: 1 — 0,034 кг/с, 2 — 0,030 кг/с, 3 — 0,024 кг/с; — — данные, рассчитанные по зависимости (18); б) красного железо-окисного пигмента: — экспериментальные данные при расходе воздуха: 1 — 0,115 кг/с, 2 — 0,108 кг/с, 3 — 0,09 кг/с; — — данные, рассчитанные по зависимости (18)

$$q = \frac{Q_d}{M_{cm}} = \frac{L_0(1-X_0)[C_{c.b.}(t_2 - t_0) + X_0(i_{п.2} - i_{п.0})]}{M_{cm}} + \frac{G_0}{100 - \omega_2} \left[ \frac{(\omega_0 - \omega_2)(i_{п.2} - C_{c.b.}t_0) + (100 - \omega_0)C_m(t_2 - t_0)}{M_{cm}} \right] + \frac{Q_{п.}}{M_{cm}} \quad (17)$$

Преобразование формулы (16) позволяет получить зависимость температуры пылегазовой смеси от технологических параметров процесса:

$$t_2 = \frac{Q_d - Q_{п.} + L_0(1 - X_0) \times [C_{c.b.}t_0 - X_0(i_{п.2} - i_{п.0})]}{L_0(1 - X_0)C_{c.b.} + \frac{G_0(100 - \omega_2)C_m}{100 - \omega_2}} - \frac{\frac{G_0}{100 - \omega_2} \left[ (\omega_0 - \omega_2)(i_{п.2} - C_{в.}t_0) - (100 - \omega_0)C_m - t_0 \right]}{L_0(1 - X_0)C_{c.b.} + \frac{G_0(100 - \omega_2)C_m}{100 - \omega_2}} \quad (18)$$

Для проверки зависимости (18) на адекватность проведены экспериментальные исследования по влиянию технологических параметров процесса измельчения на температуру пылегазовой смеси на выходе из мельницы.

На рис. 2 представлены графические зависимости температуры пылегазовой смеси от расхода материала при измельчении мрамора и красного железо-окисного пигмента.

Для полученной математической зависимости были рассчитаны показатели адекватности и сделан вывод, что математическая модель является достоверной и может быть использована для такого типа измельчителей.

**Выводы**

В результате проведенных теоретических исследований, получена математическая зависимость влияния технологических параметров процесса измельчения на температуру пылегазовой смеси на выходе мельницы. Полученная математическая модель позволяет прогнозировать работу измельчителя и определять оптимальные значения входных величин для получения качественного измельченного продукта с необходимой конечной влажностью.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Процеси та обладнання хімічної технології: підруч. / Я.М. Корнієнко, Ю.Ю. Лукач, І.О. Мікульонюк та ін. — К.: НТУУ «КПІ», 2011. — Ч.2. — 416 с.
2. Utilization of the industrial solid wastes by the fine grinding using centrifugal mill / E. Leshenko, V.I. Kravets, E. Gnatko, A. Omelchenko // The NATO Science for Peace and Security Programme. Environmental and food security and sap by in southeast Europe and Ukraine (Dnipropetrovs'k, Ukraine, May 16-19 2011). — М., 2011. — Р.66.
3. Дубовой В.М. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів і систем керування: навчальний посібник. — Вінниця: ВНТУ, 2012. — 308 с.
4. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учебное пособие. — Л.: Химия, 1987. — 576 с.
5. Поперечный А.М. Процеси і апарати харчових виробництв: підручник для студентів вищих навчальних закладів / За ред. Поперечного А.М. — Київ: ДонДУЕіТ, 2007. — 304 с.

6. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / Г.С. Борисов, В.П. Брыков, Ю.И. Дытнерский и др. Под ред. Ю.И. Дытнерского. – М.: Химия, 1991. – 496 с.

Поступила в редакцию 09.05.2019

#### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ З ОДНОЧАСНИМ СУШІННЯМ МАТЕРІАЛУ В ВІДЦЕНТРОВОМУ МЛІНІ

Тітова О.В., Кравець В.І., Мінакова Н.О., Чернецький Є.В., Гнатко О.М.

У даній роботі розглянута актуальна задача отримання математичного опису процесу подрібнення матеріалу в відцентровому млині з одночасною сушкою матеріалу. Дослідження процесу сушіння з одночасним подрібненням показали не тільки його універсальність при обробці найрізноманітніших матеріалів, але і практично миттєве видалення більшої частини вологи. При цьому сушіння інтенсифікується внаслідок не тільки швидкого розвитку поверхні контакту, але і активного перемішування повітря і матеріалу, а також в результаті більш швидкого випаровування вологи з свіжостворених поверхонь. Подрібнення матеріалів у відцентрових млинах, особливо тонкого помелу, супроводжується значним виділенням тепла, що дозволяє здійснювати сушіння матеріалу одночасно з подрібненням. Утворення теплоти в робочих зонах даного типу подрібнювачів обумовлено наступними факторами: тертям повітря і матеріалу об робочі елементи, турбулізації пилосагової суміші, виникненням нових поверхонь при руйнуванні, багаторазовим стисненням пилосагової суміші та ін. Зниження вологості подрібненого продукту є необхідною умовою для подальшого використання у виробництві, для чого використовують додаткове сушильне устаткування. З іншого боку, надмірне підвищення температури при подрібненні для багатьох матеріалів небажано, оскільки може привести до погіршення якості продукту, а також, призводить до створення вибухонебезпечної обстановки. Отримана математична модель дозволяє прогнозувати роботу подрібнювача і визначати значення вхідних величин для одержання якісного подрібненого продукту з необхідною кінцевою вологістю. У статті наданий тепловий баланс відцентрового млина. Наведено математичні залежності для розрахунку питомої витрати теплоти і температури пилосагової суміші на виході з відцентрового млина. Отримано експериментальні залежності щодо впливу технологічних параметрів на температуру пилосагової суміші, що підтверджують результати теоретичних досліджень.

**Ключові слова:** моделювання процесу подрібнення, теплота подрібнення, температура пилосагової суміші, відцентровий млин, рівняння регресії.

#### MATHEMATICAL MODELING OF THE GRINDING PROCESS WITH SIMULTANEOUS DRYING OF THE MATERIAL IN A CENTRIFUGAL MILL

Titova O.V., Kravets V.I., Minakova N.O., Chernetsky E.V., Gnatko O.M.

Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

In this work, the relevant task of obtaining a mathematical description of the process of material grinding in a centrifugal mill with simultaneous drying of the material is considered. The study of

the drying process with simultaneous grinding showed not only its versatility in processing a wide variety of materials, but also almost instantaneous removal of most of the moisture. In this case, drying is intensified due to not only the rapid development of the contact surface, but also the active mixing of air and material, as well as due to the more rapid evaporation of moisture from freshly formed surfaces. The grinding of materials in centrifugal mills, especially fine grinding, is accompanied by a significant heat release, which allows the material to be dried simultaneously with grinding. The formation of heat in the working areas of this type of grinders happens due to following factors: air and material friction on work items, turbulence in the dust-gas mixture, emergence of new surfaces during fracture, repeated compression of the dust-gas mixture, etc. Reducing the moisture content of the crushed product is a prerequisite for further use in production, for which additional drying equipment is used. On the other hand, excessive temperature increase during grinding is undesirable for many materials, as it can lead to deterioration of the product quality, and also leads to the creation of an explosive situation. The obtained mathematical model makes it possible to predict the operation of the shredder and determine the values of input quantities to obtain a high-quality grinded product with a required final humidity. The article presents the heat balance of a centrifugal mill. Mathematical dependences are given for calculating the specific heat consumption and temperature of the dust-gas mixture at the exit from the centrifugal mill. Experimental dependences on the influence of technological parameters on the temperature of the dust-gas mixture, confirming the results of theoretical studies, are obtained.

**Keywords:** modeling of grinding process, heat of grinding, temperature of the gas-dust mixture, centrifugal mill, regression equation.

#### REFERENCES

1. Korniyenko Ya.M., Lukach Yu.Yu., Mikul'onok I.O. ta in. Protsesy ta obladnannya khimichnoyi tekhnolohiyi [Processes and equipment of chemical technology]: pidruch. Kiev, NTUU «KPI», 2011. CH.2. 416 p. (in Ukrainian).
2. Leshenko E., Kravets V.I., Gnatko E., Omelchenko A. Utilization of the industrial solid wastes by the fine grinding using centrifugal mill. // The NATO Science for Peace and Security Programme. Environmental and food security and sap by in southeast Europe and Ukraine (Dnipropetrovs'k, Ukraine, May 16-19 2011). Moscow, 2011, pp. 66.
3. Dubovoy V.M. Identifikatsiya ta modelyuvannya tehnologichnih ob'ektiv i sistem keruvannya: navchalnyi posibnik [Identification and modeling of technological objects and control systems: textbook]. Vinnitsa, VNTU, 2012, 308 p. (in Ukrainian).
4. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. Primery i zadachi po kursu protsessov i apparatov himicheskoy tekhnologii [Examples and tasks on the course of processes and devices of chemical technology]. Textbook. 10 th ed., Pererab. and add. Lviv, Chemistry, 1987, 576 p. (in Ukrainian).
5. Protsesy y aparaty kharchovykh vyrobnytstv [Processes and devices of food production]: pidruchnyk dlya studentiv Vyshchyykh Navchal'nykh Zakladiv / Poperechnyy A.M. ta in. Za red. Poperechnoho A.M. DonDUEit. Khyiv: 2007, 304 p. (in Ukrainian).
6. Borysov H.S., Brykiv V.P., Dytnerkiy Yu.I. i in. Osnovni protsesy i aparaty khimichnoyi tekhnolohiyi [Basic processes and apparatuses of chemical technology]: Posibnyk z proektuvannya / Pid red. Yu.I. Dytnerkiy, 2-e yzd., Pererab. i dopoln. Moscow, Khimiya, 1991, 496 p. (in Russian).

---

**ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ**

**БЄЛЯЄВ Олександр Ростиславович** – студент кафедри системного аналізу і управління НТУ «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро, Україна)

**БЄЛЯНОВСЬКА Олена Анатоліївна** – к.т.н., доцент, доцент кафедри енергетики ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

**ГНАТКО Олена Миколаївна** – старший викладач кафедри прикладної механіки ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

**ДЕНИСЮК Ольга Ростиславівна** – к.т.н., доцент кафедри інформаційних систем ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

**ЄГОРОВ Євген Аркадійович** – д.т.н., професор, завідувач кафедри металевих конструкцій ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» (м. Дніпро, Україна)

**ЗЕЛЕНЦОВ Дмитро Гегемонівч** – д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних систем ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

**КОРОТКА Лариса Іванівна** – к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних систем ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

**КОРЯШКІНА Лариса Сергіївна** – к.ф.-м.н., доцент кафедри системного аналізу і управління НТУ «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро, Україна)

**КРАВЕЦЬ Василь Іванович** – к.т.н., доцент, завідувач кафедри прикладної механіки ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

**КУЧЕРЕНКО Олександр Євгенович** – здобувач кафедри металевих конструкцій ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» (м. Дніпро, Україна)

**ЛИТОВЧЕНКО Роман Дмитрович** – аспірант кафедри переробки пластмас та фото-, нано- і поліграфічних матеріалів ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

**МАНКО Геннадій Іванович** – к.т.н., доцент, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та метрології ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

**МІНАКОВА Наталія Олександрівна** – к.т.н., доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та метрології ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна).

**МИХАЙЛОВ Андрій Георгійович** – студент кафедри енергетики ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

**НАУМЕНКО Наталія Юріївна** – к.т.н., доцент, доцент кафедри теоретичної та прикладної економіки ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

**НИКОНЕНКО Олександра Миколаївна** – магістрант кафедри інформаційних систем ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

**ОЛЕВСЬКИЙ Віктор Ісаакович** – д.т.н., доцент, завідувач кафедри вищої математики ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

**ОЛЕВСЬКИЙ Олександр Вікторович** – студент кафедри прикладної та комп'ютерної радіофізики ДВНЗ «Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара» (м. Дніпро, Україна)

**ОЛІЙНИК Ольга Юріївна** – к.т.н., доцент, доцент кафедри метрології та контролю якості програмних засобів ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

**ПИСАРЬКОВА Валерія Ростиславівна** – асистент кафедри теоретичної та прикладної економіки ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

**СУХА Ірина Валеріївна** – к.т.н., доцент, доцент кафедри хімічної технології високомолекулярних сполук ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

**СУХИЙ Костянтин Михайлович** – д.т.н., професор, декан факультету технології органічних речовин ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

**ТАРАНЕНКО Юрій Карлович** – д.т.н., професор, завідувач кафедри метрології та контролю якості програмних засобів ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

**ПІТОВА Олена Василівна** – к.т.н., доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та метрології ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

**ЧЕРНЕЦЬКИЙ Євгеній Вячеславович** – к.т.н., доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та метрології ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

**ЧИСТОКЛІТОВ Єгор Павлович** – студент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та автоматизації ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК		ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ		NAME INDEX	
БЕЛЯЄВ О.Р.	23	БЕЛЯЕВ А.Р.	23	BELYAEV A.R.	23
БЕЛЯНОВСЬКА О.А.	3	БЕЛЯНОВСКАЯ Е.А.	3	BELYANOVSKAYA E.A.	3
ГНАТКО О.М.	70	ГНАТКО Е.Н.	70	CHERNETSKY E.V.	70
ДЕНИСЮК О.Р.	15	ДЕНИСЮК О.Р.	15	CHISTOKLETOV E.P.	30
ЄГОРОВ Є.А.	9	ЕГОРОВ Е.А.	9	DENYSIUK O.R.	15
ЗЕЛЕНЦОВ Д.Г.	15	ЗЕЛЕНЦОВ Д.Г.	15	EGOROV E.A.	9
КОРОТКА Л.І.	36	КОРОТКАЯ Л.И.	36	GNATKO O.M.	70
КОРЯШКІНА Л.С.	23	КОРЯШКИНА Л.С.	23	KOROTKA L.I.	36
КРАВЕЦЬ В.І.	70	КРАВЕЦ В.И.	70	KORIASHKINA L.S.	23
КУЧЕРЕНКО О.Є.	9	КУЧЕРЕНКО А.Е.	9	KRAVETS V.I.	70
ЛИТОВЧЕНКО Р.Д.	3	ЛИТОВЧЕНКО Р.Д.	3	KUCHERENKO A.E.	9
МАНКО Г.І.	30	МАНКО Г.И.	30	LYTOVCHENKO R.D.	3
МІНАКОВА Н.О.	70	МИНАКОВА Н.А.	70	MANKO G.I.	30
МИХАЙЛОВ А.Г.	3	МИХАЙЛОВ А.Г.	3	MIKHAILOV A.G.	3
НАУМЕНКО Н.Ю.	63	НАУМЕНКО Н.Ю.	63	MINAKOVA N.O.	70
НИКОНЕНКО О.М.	36	НИКОНЕНКО А.Н.	36	NAUMENKO N.Yu.	63
ОЛЕВСЬКИЙ В.І.	43	ОЛЕВСКИЙ А.В.	43	NIKONENKO A.N.	36
ОЛЕВСЬКИЙ О.В.	43	ОЛЕВСКИЙ В.И.	43	OLEVSKY A.V.	43
ОЛІЙНИК О.Ю.	54	ОЛЕЙНИК О.Ю.	54	OLEVSKY V.I.	43
ПИСАРЬКОВА В.Р.	63	ПИСАРЬКОВА В.Р.	63	OLIYNYK O.Yu.	54
СУХА І.В.	3	СУХАЯ И.В.	3	PISARKOVA V.R.	63
СУХИЙ К.М.	3	СУХОЙ К.М.	3	SUKHA I.V.	3
ТАРАНЕНКО Ю.К.	54	ТАРАНЕНКО Ю.К.	54	SUKHYY K.M.	3
ТІТОВА О.В.	70	ТИТОВА Е.В.	70	TARANENKO Yu.K.	54
ЧЕРНЕЦЬКИЙ Є.В.	70	ЧЕРНЕЦКИЙ Е.В.	70	TITOVA O.V.	70
ЧИСТОКЛЕТОВ Є.П.	30	ЧИСТОКЛЕТОВ Е.П.	30	ZELENTSOV D.G.	15

Науковий журнал «Комп'ютерне моделювання: аналіз, управління, оптимізація» приймає до розгляду наукові статті, а також оглядові роботи, що стосуються теоретичних та прикладних питань комп'ютерного моделювання та прикладних задач, що пов'язані з використанням методів комп'ютерного моделювання.

Журнал індексується в міжнародній наукометричній базі даних **Index Copernicus International**.

Статтям присвоюється цифровий ідентифікатор **DOI** (CrossRef).





ДВНЗ  
«УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ  
ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»  
м. ДНІПРО