

ISSN 2521-6406

Збірник наукових праць

**КОМП'ЮТЕРНЕ
МОДЕЛЮВАННЯ:
АНАЛІЗ, УПРАВЛІННЯ,
ОПТИМІЗАЦІЯ**

**№2 (2)
2017**

Р е д а к ц і й н а к о л е г і я

Головний редактор	<i>д.т.н., проф.</i> ЗЕЛЕНЦОВ Дмитро Гегемонович
Замісник головного редактора	<i>д.ф.-м.н., проф.</i> КОСОЛАП Анатолій Іванович
Відповідальний секретар	<i>к.т.н., доц.</i> 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

B. 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 збірника:

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

Зареєстровано 28.02.2017 Міністерством юстиції України серія КВ № 22571-12471Р

Рекомендовано до друку вченою радою ДВНЗ УДХТУ
(протокол № 11 від 30.11.2017)

Оригінал-макет виготовлено РВВ ДВНЗ УДХТУ.
Підписано до друку з готових форм 15.12.2017. Формат 60×84 1/8. Папір ксероксний.
Гарнітура Академічна. Друк різнограф. Умовн. друк. арк. 9,98. Обл. вид. арк. 10,07.
Тираж 300 прим. Замовлення № 954

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

Дніпро 2017

Міністерство освіти і науки України

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

Комп'ютерне моделювання: аналіз, управління, оптимізація

2 (2), 2017

Збірник наукових праць

виходить
2 рази на рік

ЗМІСТ

<i>Акбулут М., Окуян К.</i> Метод динамічного зниження цін	4
<i>Гусейнов Н.Е., Гашимов Р.Г.</i> Проектування і безпека бездротових локальних обчислювальних мереж	9
<i>Денисюк О.Р., Борзов С.О.</i> Застосування генетичних алгоритмів в задачах дискретної оптимізації кородуючих конструкцій	14
<i>Дисковський О.А., Мала Ю.А.</i> Моделювання вільних коливань прямокутної пластини з отвором довільної форми	23
<i>Зеленцов Д.Г., Ляшенко О.А.</i> Декомпозиційний метод розв'язання систем диференціальних рівнянь в задачах моделювання процесів корозійного деформування	28
<i>Іванова Є.О., Коротка Л.І.</i> Інтелектуальна підсистема діагностування захворювань на основі аналізу крові	35
<i>Косолап А.І.</i> Чисельна ефективність методу точної квадратичної регуляризації	42
<i>Манукян А.А., Селівьорстова Т.В.</i> Дослідження траєкторії поширення забруднень від точкового джерела в залежності від характеру ландшафту	48
<i>Мусаєв В.Г.</i> Математичне моделювання динамічних процесів в системах з розподіленими параметрами	54
<i>Петренко К.М., Манко Г.І.</i> Автоматизація процесу ідентифікації технологічних об'єктів управління	59
<i>Рахманов С.Р., Гармашев Д.Ю., Степаненко О.М., Донець Д.А.</i> Аналіз особливостей процесу гвинтової прокатки труб з використанням інформаційних технологій	65
<i>Сухий К.М., Коломієць О.В., Прокопенко О.М., Гаврилко А.В., Беяновська О.А.</i> Алгоритм розрахунку об'єму адсорбційного теплового акумулятора для системи децентралізованого опалювання	72
<i>Тітова О.В., Мінакова Н.О., Шуть О.Ф., Гнатко О.М.</i> Параметрична ідентифікація моделей динаміки об'єктів регулювання	77
<i>Ус С.А., Станіна О.Д.</i> Алгоритм розв'язання однієї задачі оптимального розбиття множин з додатковими зв'язками	83
Відомості про авторів	89
Іменний покажчик	91

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Акбулут М., Окуян К.</i> Метод динамического снижения цен	4
<i>Гусейнов Н.Э., Гашимов Р.Г.</i> Проектирование и безопасность беспроводных локальных вычислительных сетей	9
<i>Денисюк О.Р., Борзов С.А.</i> Применение генетических алгоритмов в задачах дискретной оптимизации корродирующих конструкций	14
<i>Дисковский А.А., Малая Ю.А.</i> Моделирование свободных колебаний прямоугольной пластины с отверстием произвольной формы	23
<i>Зеленцов Д.Г., Ляшенко О.А.</i> Декомпозиционный метод решения систем дифференциальных уравнений в задачах моделирования процессов коррозионного деформирования	28
<i>Иванова Е.А., Короткая Л.И.</i> Интеллектуальная подсистема диагностирования заболеваний на основе анализа крови	35
<i>Косолап А.И.</i> Численная эффективность метода точной квадратичной регуляризации	42
<i>Манукян А.А., Селивёрстова Т.В.</i> Исследование траектории распространения загрязнений от точечного источника в зависимости от характера ландшафта	48
<i>Мусаев В.Г.</i> Математическое моделирование динамических процессов в системах с распределенными параметрами	54
<i>Петренко Е.Н., Манко Г.И.</i> Автоматизация процесса идентификации объектов управления	59
<i>Рахманов С.Р., Гармашев Д.Ю., Степаненко А.Н., Донец Д.А.</i> Анализ особенностей процесса винтовой прокатки труб с использованием информационных технологий	65
<i>Сухой К.М., Коломиец Е.В., Прокопенко Е.М., Гаврилко А.В., Беляновская Е.А.</i> Алгоритм расчета объема адсорбционного теплового аккумулятора для системы децентрализованного отопления	72
<i>Титова Е.В., Минакова Н.А., Шуть А.Ф., Гнатко Е.Н.</i> Параметрическая идентификация моделей динамики объектов регулирования	77
<i>Ус С.А., Станина О.Д.</i> Алгоритм решения одной задачи оптимального разбиения множеств с дополнительными связями	83
Сведения об авторах	89
Именной указатель	91

CONTENT

<i>Akbulut M., Okuyan C.</i> Dynamic decreasing pricing method	4
<i>Huseynov N.E., Hashimov R.H.</i> Design and safety of wireless local computer networks	9
<i>Denysiuk O.R., Borzov S.A.</i> Utilization of genetic algorithms in problems of discrete optimization of corroding structures	14
<i>Diskovskiy O.A., Mala Yu.A.</i> Free vibrations modeling of the rectangular plate with an arbitrary from hole	23
<i>Zelentsov D.G., Liashenko O.A.</i> Decomposition method for solving systems of differential equations for the problems of modelling corrosion deformation processes	28
<i>Ivanova E.A., Korotka L.I.</i> Intellectual subsystem that is used to diagnose diseases by analyzing blood	35
<i>Kosolap A.I.</i> The numerical efficiency of the method of exact quadratic regularization	42
<i>Manukian A.A., Selivyorstova T.V.</i> Research of the trajectory of pollution diffusion from a point source depending on the nature of the landscape	48
<i>Musayev V.H.</i> Mathematical modeling of dynamic processes in systems with distributed parameters	54
<i>Petrenko E.N., Manko G.I.</i> Automation of the control objects identification process	59
<i>Rakhmanov S.R., Garmashev D.Yu., Stepanenko A.N., Donec D.A.</i> The analysis of peculiarities of the process of helical pipe-rolling with the use of information technologies	65
<i>Sukhyy K.M., Kolomiyets E.V., Prokopenko O.M., Gavrlko A.V., Belyanovskaya E.A.</i> Calculation algorithm of volume of adsorptive heat storage device for decentralized space heating system	72
<i>Titova O.V., Minakova N.O., Shut O.F., Gnatko O.M.</i> Parametric identification of dynamics models of regulated objects	77
<i>Us S.A., Stanina O.D.</i> Algorithm to solve a problem of optimum separation of sets with additional couplings	83
Information about the authors	89
Name index	91

Akbulut M.^a, Okuyan C.^b

DYNAMIC DECREASING PRICING METHOD

^a Bandırma Onyedi Eylül University, Bandırma, Turkey^b Balıkesir University, Balıkesir, Turkey

Online trading firms have to get involved in some kinds of marketing and promotion activities in the new world that appears with electronic trade. The firms that aim to profit and sell more products use different pricing methods. Aspects of internet pricing involve: consumer aspect, seller aspect, competitive aspect, relational (value focused) aspect. First of this aspects includes price differentiation and dynamic pricing. Increasing and decreasing pricing is a new kind of dynamic pricing method. Both psychological and strategical pricing methods that force customers to buy, and even to advice the goods to other customers, are used when the prices decrease. Dynamic pricing issues turns out satisfactory in industries with high initial cost, consuming capacity, short term selling, price sensitive demand. The psychological effect of the price is an important factor that makes impact on the decision to buy or on the sense of quality. The decision to buy an unnecessary product can motivate a customer to buy it by means of the price experience of another customer. The price is an important factor when the product features are satisfactory; price comparison is fast and easy on the internet. In this study it is explained that Dynamic Decreasing Pricing (DDP) benefits both psychologically and strategically as a method of pricing. With this method, buying decreases the prices, therefore the costumers are forced to buy or advice the product to other customers to make the final price lower. The firm can sell product rapidly till its limits, and therefore the loss of profit can be ignored as the selling in target time interval is high. The Dynamic Decreasing Pricing method is going to be formulated mathematically, designed with stored procedure and it is going to be practicable in database.

Keywords: e-commerce, dynamic pricing, stored procedure.

Statement of the problem

Nowadays the firms trading on the internet have to get involved in different marketing and promoting activities. The firms that aim to profit and sell more products use different pricing methods. Dynamic pricing is one of these methods; Dynamic pricing refers to the process of controlling product prices over the sales season to maximize expected revenue [1–3]. There isn't only one description of Dynamic pricing. As Lydeka and others refer, there are different academic branches and so, there are different definitions. But in this article dynamic pricing is discussed in terms of its advantages as it makes the customers buy and makes the customers make the other customers buy. Some aspects of internet pricing are shown in Table 1.

The shopping robots which can be used by means of technological developments on the internet can be discussed as an element that strengthens the

Table 1

Some aspects of Internet pricing

Pricing Aspect	Pricing strategy
Consumer Aspect	Price differentiation
	Dynamic pricing
Seller Aspect	Individual pricing
	Adaptation pricing
	Package pricing
Competitive Aspect	Price differentiation depending on brand
	Optional pricing
Relational (Value focused) Aspect	Lifelong pricing
	Alternative channel pricing

customer's price decision and enables the customer's price comparison. In terms of application the dynamic pricing issues turns out satisfactory in industries with high initial cost, consuming capacity, short term selling, price sensitive demand.

Gurgen expresses the classifying quantitative

models in literature as in the below:

- deterministic demand model in terms of discussing the demand;
- fixed or uncertain price in terms of discussing the price distribution of customer's paying desired;
- pricing in terms of considering or disregarding the sales returns;
- pricing in terms of discussing the price set.

Analysis of recent research and publications

Hong Yuan and Song Han discuss that for general demand functions in price and quality, two effects work in different directions. The sales effect is negative, that is, if the price increases, the sales decrease. The markup effect is positive, that is, if the price increases, the markup increases. Hence, the impact of quality on pricing is ambiguous. For separable additive demand functions, the sales effect vanishes and the markup effect holds. Any improvement in quality increases the product price. Finally, both process investment and product investment determine the dynamic pricing policy [4].

Paul B. Ellickson and the others make three contributions in their *Repositioning Dynamics and Pricing Strategy* article. First, they draw attention to three salient features of repositioning decisions in marketing: that they involve long-term consequences, require significant sunk investments, and are dynamic in their impact. They illustrate that positioning decisions can be empirically analyzed as dynamic games to measure structural constructs such as firm's repositioning costs. Second, they cast empirical light on an age-old question in the marketing of consumer packaged goods: the costs and benefits of using EDLP versus PROMO. Despite the significant interest in this topic, a full accounting of the long-term costs and benefits of these strategies remains lacking in the literature. Their estimates add to the evaluation of either strategy and also identify the sources of heterogeneity in the relative attractiveness of either across markets. This increases understanding of the economics of the supermarket industry and the determinants of long-term market structure. Third, they illustrate how observed switches combined with auxiliary postgame data (e.g., revenues, prices, sales) are useful in cleanly articulating the costs and benefits of repositioning in an environment with strategic interaction [5].

Y. Narahari, and others discuss that there are different models that have been used in dynamic pricing. Dynamic pricing includes two aspects: (1) price dispersion and (2) price discrimination. Price dispersion can be spatial or temporal. In spatial price dispersion, several sellers offer a given item at different prices. In temporal price dispersion, a given store varies its price for a given good over time, based on

the time of sale and supply-demand situation.

The other aspect of dynamic pricing is differential pricing or price discrimination, where different prices are charged to different consumers for the same product.

A variety of mathematical models have been used in computing dynamic prices. Most of these models formulate the dynamic pricing problem as an optimization problem. Depending on the specific mathematical tool used and emphasized, we provide a list of five categories of models: Inventory-based models, Data-driven models, Game theory models, Machine learning models, Simulation models [6].

Formulation of the research objective

The formulas needed to price a product sold online in Dynamic Decreasing Method are given below.

$$\text{rate} = \text{sellprice} - \text{lowerbound}; \quad (1)$$

$$\text{rate}_n = \text{rate} / \text{number of stock}; \quad (2)$$

$$\text{sellprice}_n = \text{sellprice}_{n-1} - \text{rate}_n. \quad (3)$$

Sell price is the price at which the product is sold first. Lowerbound is the last limit price in decreasing pricing. The price difference of sell price and lower limit gives the rate. Rate is divided into total number of stocks to be sold, in order to get rate_n . The difference between sellprice_{n-1} and rate_n gives sellprice_n of n price. In our sample scenario a 10-item product in stock and 1000 planned unit to be sold is re-priced via DDF-M pricing. After each selling the price is calculated by $\text{sellprice}_n = \text{sellprice}_{n-1} - \text{rate}_n$.

Statement of the main research material

In our sample scenario, there is a 10-item product in stock and it is planned to be sold at initial price of 1000 unit, being then re-priced via DDP-M pricing. After each selling the price is calculated by $\text{sellprice}_n = \text{sellprice}_{n-1} - \text{rate}_n$. Initial data, calculated rates and discounts for this scenario are shown in tables 2–4.

Table 2

Initial data							
Cost	800	lowerbound	900	Sellprice	1000	Number of stock	10

Table 3

Calculated rates			
rate	100	rate_n	10

Eventually while first item is sold for 1000 units, the last item is sold on 900 units. If each item was sold on 1000 unit, 2000 unit profit would be earned.

In this method the profit is 1450 unit. The loss is 550 units. The description of results is given in Table 5.

Discount applied

	Sum Sell	8550	Discount
1.	Price	990	10
2.	Price	980	10
.	Price	970	10
.	Price	960	10
8.	Price	920	10
9.	Price	910	10
10.	Price	900	10

Table 4

Table 5

DDP-M results

DDP-M profit	1450	Standard profit	2000	Ignored loss	550
--------------	------	-----------------	------	--------------	-----

When the example is discussed in terms of the firm and customer, there are two results.

1. The decreasing price has a positive effect on the customer by advising to buy the product with the positive effect of this method.

2. The firm can sell product rapidly till its limits, loss of profit can be ignored as the selling in target time interval is high.

In fig. 1, 2 the database developed using DDP-M model is shown.



Fig. 1. The database design

	id	code	lowerlimit	price
▶	1	blk2014	900	1000
	2	blk2015	450	500
*	NULL	NULL	NULL	NULL

Fig. 2. The data table design

The stored procedure is shown on Fig. 3.

Conclusion

In this article it is discussed that dynamic decreasing pricing (DDP-M) can be used as a method on internet trading. Formulas are defined and applied. It is proved that DDP-M can raise the selling rates. Both psychological and strategical pricing methods, that force the customers to buy, and even to advice the goods to other customers, are used when the prices decrease. The psychological effect of the price is an important factor on the decision to buy or the sense of quality. The decision to buy an unnecessary product can motivate a customer to buy it by means of the price experience of another customer. But this study is only focused on firm. Costumer focused researches are also possible; real world modeling of markets, buying behavior, dynamic pricing strategies can be researched.

REFERENCES

1. *Deksnyta In., Lydeka Z.* Dynamic pricing models and its methodological aspects // *Taikomoji ekonomika: sisteminiai tyrimai*. – 2013. – № 7/2. – P.143-153.
2. *Bilicik M.T., Gergen O.* Perakendecilik sektöründe Dinamik Fiyatlandırma: geniş bir literatür taraması-Dynamic Pricing in retailing industry: a wide literature survey // *İçneri dergisi*. – 2012. – № 10 (37). – P.111-119.
3. *Sibdari S., Pyke D.* Dynamic pricing with uncertain production cost: an alternating-move approach // *European Journal of Operational Research*. – 2014. – № 236 (1). – P.218-228.
4. *Hong Yuan, Song Han* The Effects of Consumers' Price Expectations on Sellers' Dynamic Pricing Strategies // *Journal of Marketing Research*. – February 2011. – Vol. 48. – No. 1. – P.48-61.
5. *Ellickson Paul B., Sanjog Misra, Harikesh S. Nair* Repositioning dynamics and pricing strategy // *Journal of Marketing Research*. – Dec 2012. – Vol. 49. – No. 6. – P.750-772.
6. *Narahari Y., Raju C.V.L., Ravikumar K., Shah Sourabh* Dynamic pricing models for electronic business // *Sadhana (Academy Proceedings in Engineering Sciences)*. Indian Academy of Sciences. – 2005. – Vol. 30. – No. 2-3. – P.231-256.

Received 31.10.2017

```

procedure [dbo].[Daf-M]
@code nvarchar(50)

as
declare @lowerlimit int
declare @productcount int
declare @price decimal(18,0)
declare @rate int
declare @rate_n int
declare @price_n decimal(18,0)
declare @pricenew decimal(18,0)

DECLARE @counter INT

set @lowerlimit=( select lowerlimit from dafdata where code=@code)
set @price=( select price from dafdata where code=@code)
set @productcount=(select COUNT(*) from Product where code =@code)
set @rate_n=@price-@lowerlimit
set @rate =(@rate_n/@productcount)

DECLARE CRS_sayhesapla CURSOR FOR

SELECT code,lowerlimit FROM dafdata where code =@code

OPEN CRS_sayhesapla
FETCH NEXT FROM CRS_sayhesapla INTO @code,@pricenew
set @sayac =0

WHILE @@FETCH_STATUS =0
BEGIN
SET NOCOUNT ON;

        while @counter<@productcount
        begin
        SELECT @counter = @counter + 1
        set @rate =(@rate_n/@productcount)
        set @rate=@rate
        insert into result (id,code,pricenew)values (@counter,@code,(@price-@rate))
        end

        SET @pricenew = @price
        UPDATE result SET @pricenew = pricenew = @pricenew -@rate where code=@code
        FETCH NEXT FROM CRS_sayhesapla INTO @code,@pricenew
        end
CLOSE CRS_sayhesapla
DEALLOCATE CRS_sayhesapla

```

Fig. 3. The stored procedure

МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОГО СНИЖЕНИЯ ЦЕН

Амбулут М., Окуян К.

Компании онлайн-трейдинга должны участвовать в некоторых видах маркетинговых и рекламных акций в новом мире, который появился с приходом электронной торговли. Фирмы, которые стремятся получить прибыль и продавать больше продуктов, используют разные методы ценообразования. Аспекты интернет-ценообразования включают в себя: потребительский аспект, аспект продавца, конкурентный аспект, реляционный (ориентированный на ценность) аспект. Первый из этих аспектов включает дифференциацию цен и динамическое ценообразование. Увеличение и снижение цен — это новый метод динамического ценообразования. При снижении цен используются как психологические, так и стратегические методы ценообразования, которые заставляют клиентов поку-

пать и даже советовать товары другим клиентам. Динамическое ценообразование демонстрирует удовлетворительные результаты в отраслях с высокой начальной стоимостью, потребляющей способностью, краткосрочными продажами, чувствительному к цене спросу. Психологический эффект цены является важным фактором, который влияет на решение о покупке или на ощущение качества. Решение о покупке ненужного продукта может побудить клиента купить его с помощью ценового опыта другого клиента. Цена является важным фактором, когда характеристики продукта удовлетворительны; сравнение цен быстро и легко осуществляется в Интернете. В этом исследовании объясняется, что динамическое снижение цен выгодно и психологически, и стратегически как метод ценообразования. При таком способе покупки снижает цены, поэтому заказчики вынуждены покупать или

рекомендовать продукт другим клиентам, чтобы снизить конечную цену. Фирма может быстро продавать продукт до своих пределов, и поэтому потеря прибыли может быть проигнорирована, поскольку продажи в целевом временном интервале высоки. Метод динамического снижения цен сформулирован математически, реализован в виде хранимой процедуры и практически применен в базе данных.

Ключевые слова: электронная коммерция, динамическое ценообразование, хранимая процедура.

МЕТОД ДИНАМІЧНОГО ЗНИЖЕННЯ ЦІН

Акбулут М., Окуян К.

Компанії онлайн-трейдингу повинні брати участь в деяких видах маркетингових і рекламних акціях в новому світі, який з'явився з приходом електронної торгівлі. Фірми, які прагнуть отримати прибуток і продавати більше продуктів, використовують різні методи ціноутворення. Аспекти інтернет-ціноутворення включають в себе: споживчий аспект, аспект продавця, конкурентний аспект, реляційний (орієнтований на цінність) аспект. Перший з цих аспектів включає диференціацію цін і динамічне ціноутворення. Збільшення і зниження цін — це новий метод динамічного ціноутворення. При зниженні цін використовуються як психологічні, так і стратегічні методи ціноутворення, які змушують клієнтів купувати і навіть радити товари іншим клієнтам. Динамічне ціноутворення демонструє задовільні результати в галузях з високою початковою вартістю, споживчою здатністю, короткостроковими продажами, чутливим до ціни попитом. Психологічний ефект ціни є важливим фактором, який впливає на рішення про покупку або на відчуття якості. Рішення про покупку непотрібного продукту може спонукати клієнта придбати його за допомогою цінового досвіду іншого клієнта. Ціна є важливим фактором, коли характеристики продукту задовільні; порівняння цін швидко і легко здійснюється в Інтернеті. У цьому дослідженні пояснюється, що динамічне зниження цін вигідно і психологічно, і стратегічно як метод ціноутворення. При такому способі покупка знижує ціни, тому замовники змушені купувати або рекомендувати продукт для клієнтів, щоб знизити кінцеву ціну. Фірма може швидко продавати продукт до своїх меж, і тому втрата прибутку може бути проігнорована, оскільки продажі в цільовому часовому інтервалі високі. Метод динамічного зниження цін сформульовано математично, реалізовано у вигляді збереженої процедури і практично застосовано в базі даних.

Ключові слова: електронна комерція, динамічне ціноутворення, збережена процедура.

DYNAMIC DECREASING PRICING METHOD

Akbulut M.^a, Okuyan C.^b

^a Bandirma Onyedi Eylul University, Bandirma, Turkey

^b Balikesir University, Balikesir, Turkey

Online trading firms have to get involved in some kinds of marketing and promotion activities in the new world that appears with electronic trade. The firms that aim to profit and sell more products use different pricing methods. Aspects of internet pricing involve: consumer aspect, seller aspect, competitive aspect, relational (value focused) aspect. First of this aspects includes price differentiation and dynamic pricing. Increasing and decreasing pricing is a new kind of dynamic pricing method. Both psychological and strategic pricing methods that force customers to buy, and even to advice the goods to other customers, are used when the prices decrease. Dynamic pricing issues turns out satisfactory in industries with high initial cost, consuming capacity, short term selling, price sensitive demand. The psychological effect of the price is an important factor that makes impact on the decision to buy or on the sense of quality. The decision to buy an unnecessary product can motivate a customer to buy it by means of the price experience of another customer. The price is an important factor when the product features are satisfactory; price comparison is fast and easy on the internet. In this study it is explained that Dynamic Decreasing Pricing (DDP) benefits both psychologically and strategically as a method of pricing. With this method, buying decreases the prices, therefore the costumers are forced to buy or advice the product to other customers to make the final price lower. The firm can sell product rapidly till its limits, and therefore the loss of profit can be ignored as the selling in target time interval is high. The Dynamic Decreasing Pricing method is going to be formulated mathematically, designed with stored procedure and it is going to be practicable in database.

Keywords: e-commerce, dynamic pricing, stored procedure.

REFERENCES

1. Deksnyti In., Lydeka Z. Dynamic pricing models and its methodological aspects. *Taikomoji ekonomika: sisteminiai tyrimai*, 2013, № 7/2, pp. 143-153.
2. Bilişik M.T., Gergen O. Perakendecilik sektöründe Dinamik Fiyatlandırma: geniş bir literatür taraması-Dynamic Pricing in retailing industry: a wide literature survey. *Çneri dergisi*, 2012, № 10(37), pp. 111-119.
3. Sibdari S., Pyke D. Dynamic pricing with uncertain production cost: an alternating-move approach. *European Journal of Operational Research*, 2014, № 236 (1), pp. 218-228.
4. Hong Yuan, Song Han The Effects of Consumers' Price Expectations on Sellers' Dynamic Pricing Strategies. *Journal of Marketing Research*, February 2011, Vol. 48, No. 1, pp. 48-61.
5. Ellickson Paul B., Sanjog Misra, Harikesh S. Nair Repositioning dynamics and pricing strategy. *Journal of Marketing Research*, Dec 2012, Vol. 49, No. 6, pp. 750-772.
6. Narahari Y., Raju C.V.L., Ravikumar K., Shah Sourabh Dynamic pricing models for electronic business. *Sadhana (Academy Proceedings in Engineering Sciences)*. Indian Academy of

УДК 004.732

Гусейнов Н.Э., Гашимов Р.Г.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И БЕЗОПАСНОСТЬ БЕСПРОВОДНЫХ ЛОКАЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Азербайджанский Технический Университет, г. Баку, Азербайджан

В представленной статье приведены результаты исследования беспроводных локальных сетей. При проектировании и эксплуатации беспроводных сетей следует уделять большое внимание защите информации. Технических проблем сетей много. Данная статья посвящена анализу способов безопасной передачи информации в локальных и корпоративных сетях. Предлагается проводить сканирование радиодиапазона нескольких точек для выявления методов шифрования. Анализ показал, что в корпоративных сетях шифрование WPA2-Enterprise является на сегодняшний день самым надежным, часто используется тип аутентификации EAP. Протоколы защиты беспроводных сетей EAP-TLS/TTLS входят в стандарт 802.1x и используют для обмена данными между клиентом и RADIUS инфраструктуру открытых ключей. Сочетание этих ключей обеспечивает надежную защиту беспроводных локальных сетей. Цифровые сертификаты нужно делать для каждого Wi-Fi устройства. Это длительный процесс, поэтому сертификаты обычно используются только в Wi-Fi-сетях, требующих максимальной защиты. В то же время можно легко отозвать сертификат и заблокировать клиента. При проектировании Wi-Fi-сетей часто нарушаются принципы безопасности, совершаются однотипные ошибки. Исследования показали, что следует ограничить возможность подключения сторонних устройств к локальной вычислительной сети, например, используя аутентификацию по протоколу 802.1x. Протокол встроен в операционные системы и специальные программные пакеты. Режим работы 802.1x. самый распространенный и надежный. Здесь аутентификатор разрешает или запрещает доступ в сеть. Использование сервера RADIUS защищает от перехвата пакетов.

Ключевые слова: беспроводные сети, шифрование, локальные сети, протокол, аутентификация.

Постановка проблемы

Беспроводные локальные вычислительные сети, беспроводные сети Wi-Fi, технологические сети вошли в нашу повседневную жизнь. Почти во всех мелких и крупных компаниях в той или иной степени выделены беспроводные сети для удобства работы сотрудников компании. В отличие от традиционных кабельных сетей доступа, где электрический провод или оптоволокно, как правило, являются контролируемой средой передачи данных, беспроводные сети относятся к неконтролируемой среде передачи данных.

Новые возможности, которые открываются при использовании беспроводных сетей, а также удобство для конечных пользователей в руках злоумышленника превращаются в новые

риски информационной безопасности. К физическим ограничениям относятся уровень сигнала и чувствительность приемопередатчика. С учетом этой особенности размываются границы периметра сети, теперь внешний злоумышленник может подключиться к локальной сети и превратиться в злоумышленника внутреннего [1].

Устройства, подключенные к корпоративной сети и создающие собственную локальную сеть, нелегитимное пользовательское оборудование беспроводной сети, часто встречающиеся примеры угроз сети.

Уязвимости беспроводных локальных вычислительных сетей и устройств много. Вот некоторые из них:

— некорректно сконфигурированные точки доступа;

- использование слабого шифрования;
- неотключенный WPS;
- отсутствие ограничений при доступе из беспроводной сети предприятия в локальную сеть предприятия;
- некорректно сконфигурированные пользовательские устройства.

Анализ последних исследований и публикаций

Устройства, имеющие доступ к корпоративной вычислительной сети или беспроводной локальной вычислительной сети, могут спровоцировать утечку информации. В частности, им может быть корпоративный ноутбук с включенной программной точкой доступа. Причем включение программной точки доступа может быть результатом целенаправленной атаки, и пользователь об этом может даже не догадываться. Примером такой уязвимости может служить тот же принтер с беспроводным модулем. Злоумышленник через уязвимость получает административный доступ и заменяет прошивку на принтере на модифицированную, получая бесконтрольный доступ к сети компании и радиопространию вокруг принтера. Большинство производителей принтеров оперативно устраняют подобные уязвимости в своих устройствах. Решением этой проблемы может быть частые обновления микропрограммного обеспечения оргтехники системными администраторами [2].

При определенных условиях можно взломать практически любое шифрование. WEP-шифрование взламывается за несколько минут. WPA-PSK- и WPA2-PSK-шифрование тоже может быть взломано. Типы шифрования WPA-PSK и WPA2-PSK подвержены атакам с использованием перебора паролей. Да, этот процесс может быть довольно долгим, но, если мощностей и времени достаточно, вполне результативным. WPA-Enterprise с паролем доступом взломать сложно, но при некотором количестве вычислительных ресурсов можно. Широко известно, что WEP-шифрование имеет низкую криптостойкость и использовать его противопоказано, но при этом данный вид шифрования все еще часто используется [3].

Протокол WPS является уязвимым и не рекомендуется к использованию, хотя иногда он имеет дополнительные механизмы защиты от перебора ключей [4].

Главной ошибкой администраторов компании является отсутствие контроля над устройствами, подключаемыми к внутренней сети компании, что приводит к повальной установке пользователями собственных уязвимых точек доступа.

Есть множество практических решений. Например, можно провести сканирование радиодиапазона нескольких центральных точек, в частности, мегаполиса, чтобы выяснить, какие типы шифрования используются и какую полезную информацию можно получить от работающих точек беспроводного доступа. Статистика по типам используемого шифрования показывает, что многие компании владельцев беспроводной локальной вычислительной сети не заботятся о безопасности, часто используют WEP-шифрование или поддерживают протокол WPS. При целевых атаках злоумышленник в рамках разведки на местности сможет идентифицировать множество компаний. А если рассматривать статистику по идентифицированным компаниям, только некоторые из них имеют должный уровень защищенности [5].

Постановка задачи

Цель статьи исследовать безопасное шифрование беспроводных локальных вычислительных сетей.

Изложение основного материала исследования

Анализ показывает, что единственное шифрование, которое можно считать надежным на сегодняшний день – это WPA2-Enterprise+802.1x с использованием сертификатов (рисунок).

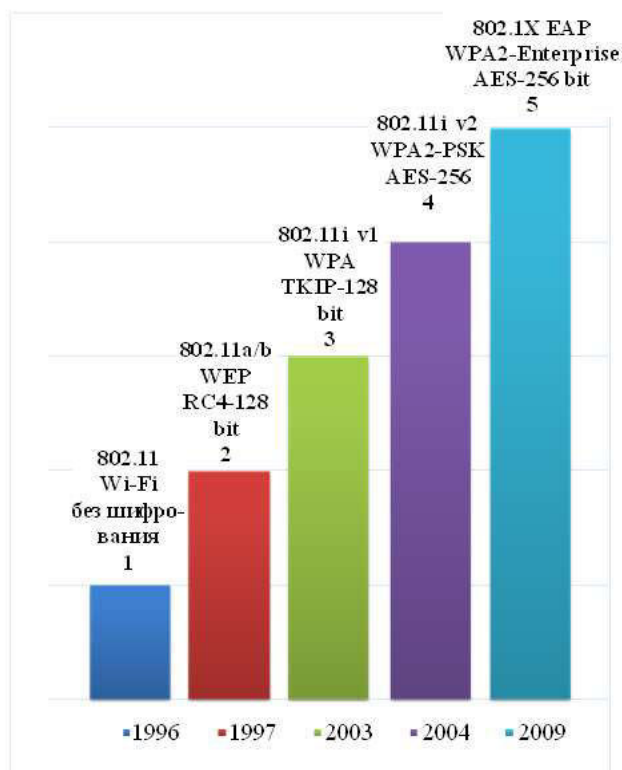
В режиме WPA2-Enterprise решаются проблемы, касающиеся распределения статических ключей и управления ими, а его интеграция с большинством корпоративных сервисов аутентификации обеспечивает контроль доступа на основе учетных записей. Для работы в этом режиме требуются такие регистрационные данные, как имя и пароль пользователя, сертификат безопасности или одноразовый пароль, аутентификация же осуществляется между рабочей станцией и центральным сервером аутентификации.

Корпоративные сети с шифрованием WPA2-Enterprise строятся на аутентификации по протоколу 802.1x через RADIUS-сервер.

Протокол 802.1x (EAPOL) определяет методы отправки и приема запроса данных аутентификации и обычно встроен в операционные системы и специальные программные пакеты.

802.1x предполагает три роли в сети:

- клиент (supplicant) – клиентское устройство, которому нужен доступ в сеть;
- сервер аутентификации (обычно RADIUS);
- аутентификатор – роутер/коммутатор, который соединяет множество клиентских устройств с сервером аутентификации и отключает/подключает клиентские устройства.



Типы сетей в зависимости от надежности

Есть несколько режимов работы 802.1x, но самый распространенный и надежный следующий:

- аутентификатор передает EAP-запрос на клиентское устройство, как только обнаруживает активное соединение;

- клиент отправляет EAP-ответ – пакет идентификации. Аутентификатор пересылает этот пакет на сервер аутентификации (RADIUS);

- RADIUS проверяет пакет и право доступа клиентского устройства по базе данных пользователя или другим признакам, и затем отправляет на аутентификатор разрешение или запрет на подключение. Соответственно, аутентификатор разрешает или запрещает доступ в сеть.

Использование сервера RADIUS позволяет отказаться от PSK и генерировать индивидуальные ключи, валидные только для конкретной сессии подключения. Проще говоря, ключи шифрования невозможно извлечь из клиентского устройства. Защита от перехвата пакетов обеспечивается с помощью шифрования по разным внутренним протоколам EAP, каждый из которых имеет свои особенности.

Среди наиболее часто используемых типов аутентификации EAP можно назвать EAP-MD-5, EAP-TLS, EAP-PEAP, EAP-TTLS, EAP-Fast и

Cisco LEAP.

EAP-MD-5 (Message Digest Challenge, проверка свертки сообщения) – метод аутентификации EAP, предоставляющий поддержку базового уровня протокола EAP. Метод EAP-MD-5 обычно не рекомендуется для применения в локальных сетях Wi-Fi, т.к. он допускает восстановление пароля пользователя. Он обеспечивает только одностороннюю аутентификацию, а не взаимную идентификацию клиента Wi-Fi и сети.

EAP-TLS (Transport Layer Security, протокол защиты транспортного уровня) – обеспечивает взаимную аутентификацию клиента и сети на базе сертификатов. Для выполнения аутентификации используются сертификаты клиента и сервера. Этот метод можно применять для динамической генерации ключей WEP для пользователя и сеанса, чтобы защитить последующую связь между клиентом беспроводной сети и точкой доступа. Один из недостатков EAP-TLS – необходимость управления сертификатами как на стороне клиента, так и на стороне сервера. В крупных беспроводных локальных сетях эта задача может быть трудновыполнимой.

EAP-TTLS (Tunneled Transport Layer Security, туннелированный протокол защиты транспортного уровня). Этот метод защиты предусматривает основанную на сертификате, взаимную аутентификацию клиента и сети через зашифрованный канал, а также средство получить динамические, ключи WEP на сеанс, в расчете на пользователя. В отличие от EAP-TLS, для работы EAP-TTLS требуются только сертификаты сервера.

Метод EAP-FAST (Flexible Authentication via Secure Tunneling, гибкая аутентификация по защищенному туннелю) был разработан компанией Cisco. Вместо сертификатов для взаимной аутентификации используются регистрационные данные PAC (Protected Access Credential), которыми может динамически управлять сервер аутентификации. Данные PAC могут предоставляться (один раз) клиенту как вручную, так и автоматически. Ручные методы включают доставку на диск или с использованием защищенных сетей. Автоматическая доставка предусматривает внутриполосную эфирную передачу.

LEAP (Lightweight Extensible Authentication Protocol, облегченный расширяемый протокол аутентификации) – разновидность метода аутентификации EAP, используемый преимущественно в беспроводных локальных сетях Cisco Aironet.

Передаваемые данные шифруются с использованием динамически генерируемых ключей WEP. Поддерживается взаимная аутентификация.

PEAP (Protected Extensible Authentication Protocol, защищенный расширяемый протокол аутентификации) — метод безопасной передачи аутентификационных данных по сетям 802.11 Wi-Fi, включающий унаследованные протоколы на базе паспортов. Для связи между клиентами PEAP и сервером аутентификации используется туннелирование. Подобно конкурирующему стандарту TTLS, PEAP позволяет проверять подлинность клиентов локальной сети Wi-Fi с использованием только сертификатов сервера. Таким образом, упрощается реализация и администрирование защищенных локальных сетей Wi-Fi. PEAP — совместная разработка Microsoft, Cisco и RSA Security.

Максимальную защиту сети Wi-Fi обеспечивает только WPA2-Enterprise и цифровые сертификаты безопасности в сочетании с протоколом EAP-TLS или EAP-TTLS. Сертификат — это заранее сгенерированные файлы на сервере RADIUS и клиентском устройстве. Клиент и сервер аутентификации взаимно проверяют эти файлы, тем самым гарантируется защита от несанкционированных подключений с чужих устройств и ложных точек доступа. Протоколы EAP-TTL/TTLS входят в стандарт 802.1x и используют для обмена данными между клиентом и RADIUS инфраструктуру открытых ключей (PKI). PKI для авторизации использует секретный ключ (знает пользователь) и открытый ключ (хранится в сертификате, потенциально известен всем). Сочетание этих ключей обеспечивает надежную аутентификацию.

Цифровые сертификаты нужно делать для каждого беспроводного устройства. Это трудоемкий процесс, поэтому сертификаты обычно используются только в Wi-Fi-сетях, требующих максимальной защиты. В то же время можно легко отозвать сертификат и заблокировать клиента.

Сегодня WPA2-Enterprise в сочетании с сертификатами безопасности обеспечивает надежную защиту корпоративных Wi-Fi-сетей. При правильной настройке и использовании взломать такую защиту практически невозможно «с улицы», то есть без физического доступа к авторизованным клиентским устройствам. Тем не менее, администраторы сетей иногда допускают ошибки, которые оставляют злоумышленникам «лазейки» для проникновения в сеть. Про-

блема осложняется доступностью софта для взлома и пошаговых инструкций, которыми могут воспользоваться даже дилетанты.

При проектировании и эксплуатации Wi-Fi-сетей часто нарушаются принципы безопасности, причем, как правило, совершаются однотипные ошибки:

- ошибки на этапе проектирования;
- отсутствие разграничения между сетями и основной сетью предприятия;
- кабельная и беспроводная сети между собой должны иметь разграничение;
- доступ в корпоративную сеть из сети должен быть ограничен только требуемыми адресами и сервисами.

Выводы

Существует множество решений по защите и мониторингу беспроводных сетей и радиодиапазона. Такие решения предлагают и крупные производители сетевого оборудования.

Рекомендуется проводить периодическую проверку офисных помещений и радиоэфира на наличие подобных устройств и ограничить возможность подключения сторонних устройств к локальной вычислительной сети предприятия, например, используя аутентификацию по протоколу 802.1x. Необходимо не допускать утечек паролей или использовать общие пароли. Данная ошибка пересекается с похожей ошибкой при проектировании, но при этом является самостоятельной ошибкой, потому что как бы грамотно ни была спроектирована защита, на этапе эксплуатации часто возникают множественные нарушения. Для собственных устройств пользователей желательно создать выделенную сеть без доступа к основной сети предприятия.

Защита беспроводных локальных вычислительных сетей — задача комплексная. Основные рекомендации вытекают из основных ошибок, перечисленных выше: разграничение доступа в/из сети; проведение радиопланирования при проектировании сети; использование Wireless Intrusion Prevention System (WIPS); использование систем управления доступом к сети с возможностью профилирования и оценки состояния.

К проектированию беспроводных сетей нужно подходить обстоятельно, уделяя должное внимание вопросам безопасности. Правильная настройка позволяет приблизить защищенность Wi-Fi к уровню защищенности проводной сети с внедренным протоколом 802.1x.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Росс Дж. Wi-fi. Беспроводные сети. Установка. Конфигурирование. Использование: Пер. с англ. В.А. Ветлужских — М.: НТ Пресс, 2005. — 312 с.
2. Гейер Дж. Беспроводные сети. Первый шаг: Пер. с англ. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. — 192 с.
3. Гордейчик С.В., Дубровин В.В. Безопасность беспроводных сетей. — М.: Горячая линия — Телеком, 2008. — 288 с.
4. Борисов В.И., Щербakov В.Б., Ермаков С.А. Спектр уязвимостей беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 // Информация и безопасность. — 2008. — Т. 11. — № 3. — С.431-434.
5. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / Вишнеvский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.Л. — М.: Техносфера, 2005. — 592 с.

Поступила в редакцию 02.10.2017

ПРОЕКТУВАННЯ І БЕЗПЕКА БЕЗДРОТОВИХ
ЛОКАЛЬНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ МЕРЕЖ

Гусейнов Н.Е., Гашимов Р.Г.

У представлений статті були досліджені бездротові локальні мережі. При проектуванні і експлуатації бездротових мереж слід приділяти велику увагу захисту інформації. Технічних проблем мереж багато. Дана стаття присвячена аналізу способів безпечної передачі інформації в локальних і корпоративних мережах. Пропонується проводити сканування радіодіапазону декількох точок для виявлення методів шифрування. Аналіз показав, що в корпоративних мережах шифрування WPA2-Enterprise є на сьогоднішній день найнадійнішим, часто використовується тип аутентифікації EAP. Протоколи захисту бездротових мереж EAP-TLS/TLS входять в стандарт 802.1x і використовують для обміну даними між клієнтом і RADIUS інфраструктуру відкритих ключів. Поєднання цих ключів забезпечує надійний захист бездротових локальних мереж. Цифрові сертифікати потрібно робити для кожного Wi-Fi-пристрою. Це тривалий процес, тому сертифікати зазвичай використовуються тільки в Wi-Fi-мережах, які вимагають максимального захисту. У той же час можна легко відкласти сертифікат і заблокувати клієнта. При проектуванні Wi-Fi-мереж часто порушуються принципи безпеки, відбуваються однотипні помилки. Дослідження показали, що слід обмежити можливість підключення сторонніх пристроїв до локальної обчислювальної мережі, наприклад, використовуючи аутентифікацію по протоколу 802.1x. Протокол вбудований в операційні системи і спеціальні програмні пакети. Режим роботи 802.1x найпоширеніший і надійний. Тут аутентифікатор дозволяє або забороняє доступ в мережу. Використання сервера RADIUS захищає від перехоплення пакетів.

Ключові слова: бездротові мережі, шифрування, локальні мережі, протокол, аутентифікація.

DESIGN AND SAFETY OF WIRELESS LOCAL
COMPUTER NETWORKS

Huseynov N.E., Hashimov R.H.

Azerbaijan Technical University, Baku, Republic of Azerbaijan

In the provided article wireless local area networks were probed. In case of design and maintenance of wireless networks it is necessary to pay the big attention to information security. There are a lot of technical issues of networks. This article is devoted to the analysis of methods of safe information transfer on the local and corporate area networks. It is offered to carry out scanning of a radio-frequency range of several access points for detection of cryptography techniques. The analysis showed that encoding WPA2 Enterprise is the most reliable today in corporate networks, EAP authentication type is often used. Protocols of protection of wireless networks EAP-TLS/TLS are included into the standard 802.1x and use the infrastructure of public keys for a data interchange between the client and RADIUS. The combination of these keys provides reliable protection of wireless local area networks. Digital certificates should be created for each Wi-Fi device. It is a long process, therefore certificates are usually used only on the Wi-Fi networks requiring the maximum protection. At the same time it is possible to withdraw easily the certificate and to disable the client. In design of Wi-Fi networks the principles of safety are often broken, the same mistakes are made. Research showed that it is necessary to restrict a possibility of connection of third-party devices to a local computer network, for example, using authentication according to the protocol 802.1x. The protocol is built into operating systems and special software packages. Operation mode 802.1x is the most widespread and reliable. Here the authenticator resolves or forbids access to a network. Use of the RADIUS server protects from interception of packets.

Keywords: wireless networks, encoding, local area networks, protocol, authentication.

REFERENCES

1. Ross Dzh. Wi-fi. Besprovodnyie seti. Ustanovka. Konfigurirovanie. Ispolzovanie: Per. s angl. V.A. Vetluzhskih [The book of Wi-Fi Install, Configure, and Use]. NT Press, Moscow, 2005. 312 p. (in Russian).
2. Geyer Dzh. Besprovodnyie seti. Pervyy shag: Per. s angl. [Wireless. The first step]. Izdatelskiy dom «Vilyame», Moscow, 2005. 192 p. (in Russian).
3. Gordeychik S.V., Dubrovin V.V. Bezopasnost besprovodnyih setey [Wireless security]. Goryachaya liniya — Telekom, Moscow, 2008. 288 p. (in Russian).
4. Borisov V.I., Scherbakov V.B., Ermakov S.A. Spektr uyazvimostey besprovodnyih setey standarta IEEE 802.11 [The spectrum of vulnerabilities of wireless networks standard IEEE 802.11]. Informatsiya i bezopasnost, 2008, vol. 11, no. 3, pp. 431-434. (in Russian).
5. Vishnevskiy V.M., Lyahov A.I., Portnoy S.L., Shahnovich I.L. Shirokopolosnyie besprovodnyie seti peredachi informatsii [Broadband wireless data transmission network]. Tehnosfera, Moscow, 2005. 592 p. (in Russian).

Денисюк О.Р., Борзов С.А.

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ В ЗАДАЧАХ ДИСКРЕТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ КОРРОДИРУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепр, Украина

В работе предлагается новый эффективный алгоритм решения задач оптимального проектирования корродирующих шарнирно-стержневых конструкций, предполагающий получение решения с заданной точностью. При решении оптимизационной задачи требуется определить параметры сечений элементов таким образом, чтобы объём конструкции был минимальным, и в течение заданного срока эксплуатации она сохраняла несущую способность, то есть удовлетворяла ограничениям по прочности и устойчивости. Вычисление функций ограничений предполагает численное решение системы дифференциальных уравнений, описывающих процесс коррозии в элементах конструкции. Влияние механических напряжений на скорость коррозии предполагает решение задачи напряжённо-деформированного состояния в каждом узле временной сетки, что приводит к повышенным требованиям к эффективности вычислительного алгоритма. Шарнирно-стержневые конструкции изготавливаются из прокатных профилей, размеры сечений которых регламентированы стандартами. В связи с этим поиск решения осуществлялся на дискретном неметрическом множестве варьируемых параметров. Оптимизационный алгоритм построен на использовании стратегии скользящего допуска совместно с вещественным целочисленным генетическим алгоритмом. Использование метода скользящего допуска позволяет менять точность решения на разных этапах решения оптимизационной задачи с использованием генетического алгоритма. Для обеспечения требуемой точности вычисления функций ограничений в окрестности экстремума используется искусственная нейронная сеть, аппроксимирующая зависимость между параметрами конструкции, допустимой погрешностью решения (критерием скользящего допуска) и параметрами вычислительных процедур. Анализ эффективности разработанного алгоритма, использующий в качестве критерия эффективности количество обращений к процедуре метода конечных элементов в процессе поиска оптимального решения, продемонстрировал существенное снижение вычислительных затрат по сравнению с известными алгоритмами.

Ключевые слова: оптимальное проектирование, дискретная оптимизация, генетический алгоритм, метод скользящего допуска, нейронная сеть, коррозия.

Постановка проблемы

В процессе эксплуатации конструкции, используемые, в частности, в химической промышленности, подвергаются воздействию технологических рабочих сред, агрессивных по отношению к металлу. Это вызывает разрушение приповерхностного слоя металла (коррозионный износ) и приводит к уменьшению геометрических размеров сечений конструктивных элементов, снижению несущей способности конструкций и преждевременному выходу их из строя. Можно выделить три вида потерь от коррозии:

прямые потери – стоимость разрушенного вследствие коррозии металла, косвенные, связанные с экономическим ущербом в результате преждевременного выхода конструкций из строя, и потери, вызванные нерациональными конструкторскими решениями. Потери третьего вида обусловлены, по мнению авторов, отсутствием надёжных, точных и эффективных методик оптимального проектирования конструкций с учётом происходящих коррозионных процессов.

При решении задач оптимального проектирования конструкций, подверженных воздействию агрессивных сред, важнейшим критери-

ем выбора численного алгоритма является его эффективность (возможность получения решения с минимальными вычислительными затратами). Значимость этого критерия связана с затратами при вычислении функций ограничений (ФО).

Вычисление ФО предполагает численное решение системы дифференциальных уравнений (СДУ), описывающих процесс коррозии в элементах конструкции. Существенное влияние механических напряжений на скорость коррозии предполагает решение задачи напряжённо-деформированного состояния, например, методом конечных элементов в каждом узле временной сетки [1]. Наличие обратной связи в математических моделях расчета и существенное возрастание количества параметров, определяющих в произвольный момент времени геометрические размеры конструкции, обуславливают значительное увеличение вычислительных затрат при решении задач такого типа по сравнению с «классическими» задачами оптимизации. Это делает проблему эффективности численных алгоритмов особенно актуальной для задач данного класса.

В процессе поиска оптимального решения варьируемые параметры изменяются на каждой итерации, и при неизменном параметре численного решения СДУ контролировать погрешность вычисления ФО невозможно. Таким образом, второй актуальной проблемой является погрешность получаемого решения.

В качестве объекта исследования в данной работе рассматриваются шарнирно-стержневые конструкции (ШСК), функционирующие в высокоагрессивных технологических средах. Для таких сред характерны высокая скорость процесса коррозии (более 0,05 см/год), а также существенное влияние механических напряжений на скорость процесса. Некоторые наиболее распространённые модели, описывающие этот процесс, приведены в [1]. Там же приведено обоснование модели, принятой для дальнейшего исследования:

$$\frac{d\delta}{dt} = v_0 (1 + k\sigma), \quad (1)$$

здесь δ — глубина коррозионного поражения (параметр повреждённости); t — время; v_0 — скорость коррозии при отсутствии напряжений; k — коэффициент влияния напряжения; σ — абсолютное значение напряжения.

Постановка задачи оптимального проектирования корродирующих ШСК может быть

сформулирована следующим образом. Требуется определить параметры сечений элементов таким образом, чтобы объём конструкции был минимальным, и в течение заданного срока эксплуатации она сохраняла несущую способность, то есть удовлетворяла ограничениям по прочности и устойчивости.

$$F(\bar{x}) = \sum_{i=1}^N L_i A_i(\bar{x}) \rightarrow \min; \quad \bar{x} \in X_D; \quad (2)$$

$$X_D : \{ \bar{x} \in E^n \mid g(\bar{x}) = \sigma_i^*(\bar{x}, t^*) - \sigma_i(\bar{x}, t^*) \geq 0; i \in \overline{1, N} \}, \quad (3)$$

здесь L_i, A_i — длина и площадь сечения i -го элемента; N — количество элементов конструкции; $\bar{x}$ — вектор варьируемых параметров; σ_i и σ_i^* — текущее и предельное напряжения в i -м элементе; t^* — заданное время эксплуатации конструкции.

Ранее в качестве варьируемых параметров рассматривались размеры сечений стержней, при этом форма сечения полагалась известной. Так, в [2–3] рассматривались стержни круглого и кольцевого сечений. Варьируемые параметры изменялись непрерывно в заданных границах.

В настоящей работе предлагается рассматривать ШСК, элементы которых изготовлены из стандартных прокатных профилей: двутавра, швеллера, уголка. В этом случае размеры сечения, во-первых, могут изменяться только дискретно, во-вторых, не могут изменяться независимо. Поэтому вектор варьируемых параметров будет представлять собой совокупность индексов, определяющих тип и типоразмер сечения. Пространство поиска решения оптимизационной задачи, таким образом, является дискретным и неметрическим.

При моделировании поведения конструкции в агрессивной среде принимаются следующие допущения:

- в местах соединений стержней процесс коррозии протекает так же, как и во всей конструкции в целом;

- в конструкции отсутствуют монтажные напряжения; величина напряжений в элементах определяется только внешними нагрузками и собственным весом стержней.

Анализ последних исследований и публикаций

Обзор исследований по проблеме использования методов нелинейного математического программирования при решении задач оптимального проектирования конструкций, подвер-

женных воздействию агрессивных сред, достаточно полно представлен в [4]. За годы, прошедшие после выхода обзора, получили развитие различные алгоритмы метода скользящего допуска (МСД), позволяющие уменьшить вычислительные затраты за счёт изменения точности вычисления ФО на различных этапах решения задачи оптимизации [5]. Однако существующие алгоритмы этого метода не гарантируют получения результата с требуемой точностью. Для этого необходим алгоритм управления погрешностью численного решения СДУ, моделирующих процесс накопления геометрических повреждений в элементах конструкций.

В работе [2], очевидно, впервые, было предложено использовать искусственные нейронные сети (ИНС) для определения параметров численного решения СДУ, обеспечивающих для текущего вектора варьируемых параметров заданную точность решения. В дальнейшем эта идея была использована при создании алгоритма управления точностью численного решения СДУ.

Работы [2–3] были посвящены решению задач оптимизации корродирующих шарнирно-стержневых конструкций (ШСК) на непрерывном множестве варьируемых параметров, что существенно снижало их практическое применение. Как правило, ШСК изготавливаются из прокатных профилей, размеры сечений которых регламентированы стандартами. Значительно больший интерес, по мнению авторов, представляют постановки задач, предполагающие дискретное изменение размеров сечений стержневых элементов. Варьируемыми параметрами в такой постановке могут быть тип и типоразмер профиля. Таким образом, имеет место задача дискретной оптимизации комбинаторного типа, решение которой ищется на неметрическом множестве (множестве индексов).

В последние годы для решения задач дискретной оптимизации с успехом используются генетические алгоритмы (ГА) [6–9]. При реализации ГА используется информация только о целевой функции и функциях ограничений, следовательно, их эффективность объективно ниже, чем у методов математического программирования, использующих производные этих функций. Один из способов повышения эффективности ГА заключается в минимизации вычислительных затрат при вычислении ФО.

Формулирование цели исследования

Целью настоящей работы является создание эффективного алгоритма решения задачи

оптимального проектирования корродирующих конструкций на основе генетических алгоритмов совместно с методом скользящего допуска и нейросетевым алгоритмом управления точностью вычисления функций ограничений.

Изложение основного материала исследования

Как отмечалось выше, наиболее важными при построении оптимизационных алгоритмов являются взаимно противоречивые критерии – точность и эффективность. В данном случае точность решения подразумевает не только нахождение глобального минимума функции (2), но, в первую очередь, точность вычисления функций ограничений. Как отмечено в [10], вопрос о том, как именно разрушится конструкция вследствие коррозионного износа, имеет чисто теоретическое значение. Главным критерием является её долговечность, для вычисления которой используется модель коррозионного деформирования конструкции.

Поведение конструкции в агрессивной среде моделируется путём численного решения задачи Коши для системы дифференциальных уравнений вида:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = v_0 \left[1 + \sigma_i(\bar{\delta}) \right]; \delta_i|_{t=0} = 0; i = \overline{1, N}, \quad (4)$$

где δ_i и σ_i – глубина коррозионного поражения и напряжение в i -м элементе.

Вычисление функций напряжений предполагает решение системы уравнений механики, состоящей из системы уравнений равновесия и совместности деформаций, соотношений Коши и закона Гука. В терминах метода конечных элементов эта система имеет вид:

$$\begin{aligned} \bar{R} &= K \cdot \bar{u}; \\ \bar{\varepsilon} &= D \cdot \bar{u}; \\ \bar{\sigma} &= E \cdot \bar{\varepsilon}, \end{aligned} \quad (5)$$

здесь K, D, E – матрицы жёсткости, дифференцирования и упругости; $\bar{R}, \bar{u}, \bar{\varepsilon}, \bar{\sigma}$ – векторы внешних нагрузок, узловых перемещений, деформаций и напряжений. При этом коэффициенты матрицы жёсткости зависят от площадей сечений, а, следовательно, изменяются во времени.

Таким образом, в общем случае решение системы (4) возможно только численно. Очевидно, что вычислительные затраты на решение такой задачи многократно превышают те,

которые необходимы для решения задачи оптимального проектирования в традиционной постановке.

Параметры численного решения СДУ как правило остаются постоянными в процессе решения задачи. В то же время геометрические характеристики сечений стержней изменяются в пределах, заданных границами изменения варьируемых параметров. Погрешность получаемого результата в этом случае не поддаётся прогнозу. Назначение таких параметров численного решения, которые с приемлемой вероятностью позволят определить долговечность конструкции с допустимой погрешностью на всём пространстве решений, приведёт к чрезмерным вычислительным затратам. Для успешного решения данной проблемы необходимо определять параметры численного решения СДУ на основании информации о параметрах конструкции (варьируемых и постоянных), параметрах АС и величины допустимой погрешности. Другими словами, необходимо построить аппроксимирующую функцию, формализующую эту зависимость. Для этого следует выбрать алгоритм решения СДУ и параметр управления погрешностью её решения, определить значимые параметры и способ аппроксимации.

Аппроксимировать зависимость между параметром численного алгоритма решения СДУ, параметрами стержневого элемента, АС и допустимой погрешностью решения предлагается с помощью искусственной нейронной сети (ИНС). На рис. 1 показана архитектура нейронной сети для растянутых и сжатых стержней. Они отличаются входными параметрами.

Для растянутого стержня значимыми параметрами являются площадь и периметр сечения, начальное напряжение и скорость коррозии. Так как форма сечения при этом значения не имеет, в качестве эквивалентного сечения предлагается использовать кольцо. Входные параметры нейронной сети при этом – внешний

радиус R , отношение внутреннего радиуса к внешнему g , начальное напряжение y_0 , скорость коррозии при отсутствии напряжений v_0 и допустимая погрешность решения ε^* .

Для сжатого стержня форма сечения является важнейшим параметром, так как она определяет правила вычисления момента инерции сечения. Для каждого типа сечения (двутавр, швеллер, равнополочный и неравнополочный уголки) обучается своя сеть. Все размеры фасонных профилей регламентируются стандартами, поэтому в качестве входного параметра вместо радиусов, которые применялись в случае растянутого стержня, используется номер типоразмера соответствующего профиля n . Длина стержня оказывает существенное влияние на значение критического напряжения потери устойчивости. Она может быть пересчитана по величине начального критического напряжения потери устойчивости σ_0^* , которое является дополнительным входным параметром для данной ИНС.

Подробное описание нейросетевого алгоритма управления погрешностью изложено в [11].

Для решения поставленной задачи предложен и обоснован алгоритм, позволяющий, по мнению авторов, существенно снизить вычислительные затраты при одновременном выполнении условия точности получаемого оптимального решения.

Для сведения исходной задачи (2)–(3) к задаче на безусловный экстремум используется метод внешних штрафных функций. Исходная задача преобразуется к следующему виду:

$$P(\bar{x}) = F(\bar{x}) + \sum_{i=1}^N H_i [\sigma_i^*(\bar{x}, t^*) - \sigma_i(\bar{x}, t^*)];$$

$$H_i = \begin{cases} 0, & \text{если } \sigma_i^*(\bar{x}, t^*) \geq \sigma_i(\bar{x}, t^*) \\ H^*, & \text{если } \sigma_i^*(\bar{x}, t^*) < \sigma_i(\bar{x}, t^*), \end{cases} \quad (6)$$

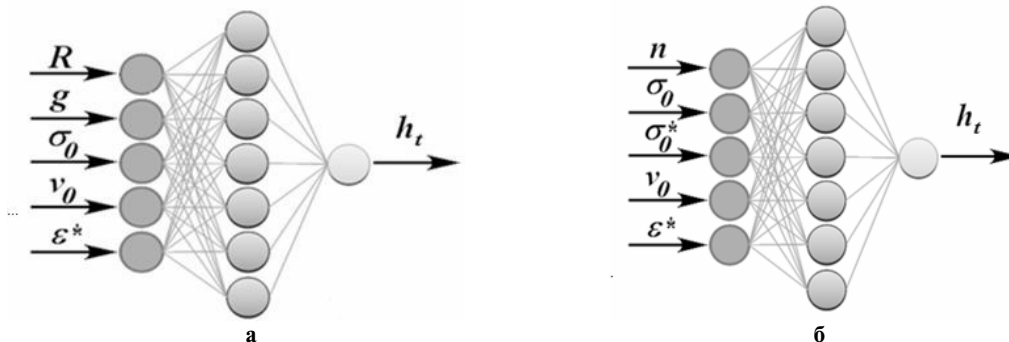


Рис. 1. Архитектура нейронной сети для растянутого (а) и сжатого (б) стержней

где H^* — штрафной коэффициент.

Для решения задачи безусловной оптимизации предлагается использовать целочисленный генетический алгоритм. Основные положения построения ГА достаточно полно изложены, например, в [12], поэтому ниже приводятся лишь способы формирования пространства решений и кодирования хромосомы, используемые в данной работе.

В большинстве известных работ, посвященных дискретной оптимизации шарнирно-стержневых конструкций, в качестве варьируемых параметров рассматривались площади сечений конструктивных элементов [6–9]. В данных работах, однако, не рассматривались конструкции, эксплуатирующиеся в условиях агрессивных сред, и, соответственно, не принималось во внимание изменение геометрических характеристик стержней в результате коррозионного износа. Поскольку площади сечений элементов конструкции будут меняться по мере накопления геометрических повреждений, это не позволяет использовать их в качестве варьируемых параметров в данной задаче. Авторами предлагается новый способ кодирования пространства решений оптимизационной задачи в виде трёхмерного массива, строки которого содержат размеры сечений и определяются варьируемыми параметрами (индексами).

Хромосома (аналог вектора варьируемых параметров) представляет собой множество индексов, определяющих положение размеров сечений в трёхмерном массиве, где номер слоя (тип сечения) определяется нечётными индексами, номер строки (типоразмер сечения) — чётными. Таким образом, количество генов (аналог варьируемого параметра) в хромосоме равно $2N$, где N — количество стержневых элементов, оптимальные параметры которых требуется определить. На рис. 2 и 3 показано пространство решений оптимизационной задачи и способ кодирования хромосомы.

Рассматриваемые в работе сечения описываются разным количеством размерами (от 4 для равнополочного уголка до 7 для двутавра). В этом случае построение модели корродирующего сечения реального профиля связано со значительными неудобствами, поэтому в работе используются модели сечений, состоящих из прямоугольных фрагментов. Такие сечения определяются четырьмя размерами, независимо от его типа. Размеры определяются таким образом, чтобы изменение геометрических характеристик (площади и минимального момента инерции) в

них происходило так же, как и в реальных сечениях. Методика определения размеров таких модельных сечений приведена в [13].

Процедура декодирования данных, содержащихся в хромосоме, заключается в извлечении из массива размеров сечений значений, расположенных в том слое и строке, номера которых соответствуют парам генов.

Описание моделей эволюции и популяции, используемых при решении задачи, а также реализованных генетических операторов будут приведены ниже в численной иллюстрации.

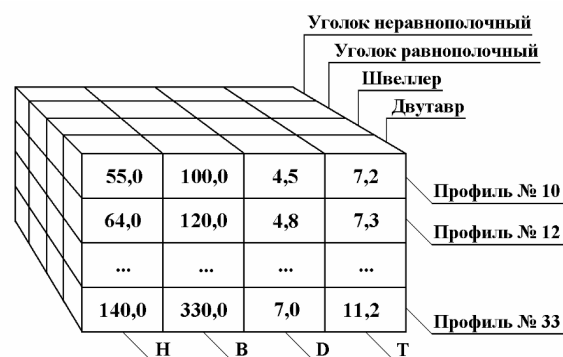


Рис. 2. Пространство решений задачи

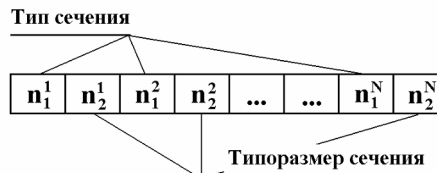


Рис. 3. Пример кодирования хромосомы

Возможность управления погрешностью вычисления функций ограничений позволит существенно повысить эффективность оптимизационного алгоритма. Для этого в работе предлагается использовать совместно с генетическим алгоритмом метод скользящего допуска [14].

При использовании метода скользящего допуска (МСД) система ограничений (3) может быть представлена в виде:

$$X_D : \{ \bar{x} \in E^n \mid g_1(\bar{x}) = Y(k) - T(\bar{x}, t^*) \geq 0 \} , \quad (7)$$

где Y — критерий скользящего допуска (КСД) — убывающая функция номера итерации k при решении задачи оптимизации; T — функционал над всем множеством функций ограничений.

В качестве Y предлагается принять допус-

тимую погрешность вычисления ФО, в качестве Т — относительную погрешность вычисления ФО. Решение задачи ищется как на границе допустимой области пространства решений, так и за её пределами на расстоянии, определяемом критерием скользящего допуска.

В этом случае на начальных итерациях поиска решения погрешность вычисления ФО может быть достаточно высокой, что позволяет минимизировать вычислительные затраты, в окрестности же экстремума погрешность не превышает некоторой допустимой величины, определяемой заказчиком. Общая схема алгоритма решения задачи оптимизации приведена на рис. 4.

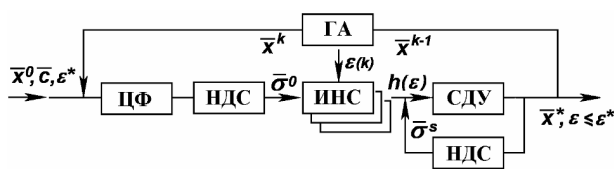


Рис. 4. Схема алгоритма решения задачи оптимизации

В процессе решения задачи, согласно идее МСД, значение критерия скользящего допуска (допустимой погрешности вычисления функции ограничений) должно уменьшаться по мере приближения к экстремуму. Предлагается уменьшать КСД в зависимости от номера эпохи при работе ГА:

$$Y(k) = \varepsilon_k = \varepsilon_{\max} - \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}{n} \cdot \text{int} \left(\frac{k \cdot n}{k_{\max}} \right), \quad (8)$$

здесь $k_{\max}$ — максимальное количество эпох; n — количество шагов изменения КСД; $\varepsilon_{\min}$, $\varepsilon_{\max}$ — допустимые значения погрешностей на начальном этапе решения задачи и в окрестности экстремума.

Штрафные слагаемые в функции (4) будут определяться по формуле

$$H = H^* \cdot \left(Y(k) - \frac{|t^* - t[\bar{x}, h_t(\bar{x}, Y(k))]|}{t^*} \right), \quad (9)$$

где h_t — шаг численного решения СДУ (5), зависящий от значений варьируемых параметров и допустимой погрешности на k -й эпохи при реализации генетического алгоритма.

Для иллюстрации предложенного алгоритма рассмотрим решение задачи оптимального проектирования статически неопределимой пятистержневой фермы (рис. 5).

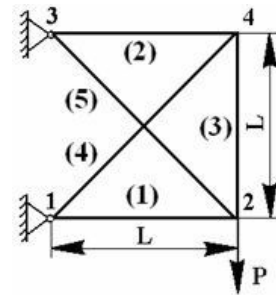


Рис. 5. Расчётная схема модельной конструкции

При тестировании оптимизационного алгоритма использовалась начальная популяция из 250 особей. Объектом исследований служила пятистержневая ШСК, показанная на рис. 4. Конструкция должна была сохранять свою несущую способность не менее, чем 2,5 года.

Задача оптимизации решалась на протяжении 100 эпох или до достижения полного схождения популяции. При этом, согласно алгоритму метода скользящего допуска, погрешность вычисления функции ограничений снижалась после каждых 20 эпох или при достижении схождения популяции, что позволило снизить вычислительные затраты на ранних этапах оптимизации и получить погрешность численного решения, не превышающую заданной заказчиком допустимой величины, вблизи экстремума. В данном случае, максимальная погрешность вычисления функции ограничений на начальных итерациях поиска составила 5%, минимальная погрешность на последних итерациях — 1%.

В используемом для решения задачи генетическом алгоритме была реализована модель эволюции де Фриза, которая характеризуется высокой вероятностью мутаций. При этом возможность мутации была предусмотрена только для чётных генов, определяющих размер сечения. В алгоритме были использованы одноточечный оператор кроссовера и оператор турнирного отбора.

Оптимальные сечения элементов ШСК, полученные в результате решения задачи, представлены в табл. 1.

Объем полученной конструкции составил 34604,42 см³.

Таблица 1
Оптимальные сечения стержней пятиэлементной фермы

№	Тип сечения	Типоразмер	t, лет
1	Уголок	125×125×9	2,52948
2	Уголок	125×80×8	2,56995
3	Уголок	125×80×8	2,57016
4	Уголок	140×140×10	2,69019
5	Уголок	125×125×9	2,55430

В качестве критерия эффективности разработанного алгоритма принималось количество обращений к процедуре метода конечных элементов в процессе поиска оптимального решения. В табл. 2 показаны результаты тестирования эффективности алгоритма. В строках табл. 2 приведены данные о количестве решений задачи МКЭ:

– при использовании для вычисления функции ограничений фиксированного шага, обеспечивающего погрешность, не превышающую $\epsilon_{\min}$ на всём множестве варьируемых параметров;

– при использовании нейросетевого модуля для определения расстояния между узлами временной сетки на основании информации о текущих параметрах конструкции, параметрах агрессивной среды и допустимой погрешности $\epsilon_{\min}$;

– при использовании нейросетевого модуля в сочетании с методом скользящего допуска.

Таблица 2
Анализ эффективности алгоритма

Алгоритм	Количество обращений к МКЭ
ГА	3 375 508
НС+ГА	1 618 484
МСД+НС+ГА	528 043

Выводы

Предложено и обосновано использование генетических алгоритмов при решении задач дискретной оптимизации корродирующих шарнирно-стержневых конструкций. Разработанный авторами нейросетевой алгоритм управления погрешностью вычисления функций ограничений позволил использовать концепцию метода скользящего допуска и существенно снизить вычислительные затраты на поиск оптимальных решений. С помощью оптимизационного алгоритма получены решения новых задач оптимизации, представляющие научный и практический интерес.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зеленцов Д.Г., Ляшенко О.А., Науменко Н.Ю. Информационное обеспечение расчетов корродирующих объектов. Математические модели и концепция проектирования систем. – Днепропетровск: УГХТУ, 2012 – 264 с.

2. Зеленцов Д.Г., Короткая Л.И. Нейронные сети как средство модификации метода скользящего допуска // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 4/4 (52). – С.21-24.

3. Зеленцов Д.Г., Новикова Л.В., Науменко Н.Ю. Алгоритм управления точностью численного решения некоторых классов систем дифференциальных уравнений // Системні технології. – 2012. – Вип. 5 (82). – С.71-79.

4. Зеленцов Д.Г., Филатов Г.В. Обзор исследований по применению методов нелинейного математического программирования к оптимальному проектированию конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой // Вопросы химии и химической технологии. – 2002. – № 4. – С.108-115.

5. Зеленцов Д.Г., Науменко Н.Ю. Адаптация метода скользящего допуска к задачам оптимизации корродирующих конструкций // Системні технології. – 2005. – Вип. 2 (37). – С.48-56.

6. Cazacu R., Grama L. Steel Truss Optimization Using Genetic Algorithms and FEA // Procedia Technology. – 2012. – Vol. 12. – P.339-346.

7. Azad S.K., Kulnarni A.J. Structural optimization using a mutation-based genetic algorithm // Iran University of Science & Technology. – 2012. – Vol. 2. – № 1. – P.81-101.

8. Webb D., Alobaidi W., Sandgerm E. Structural Design via Genetic Optimization // Modern Mechanical Engineering. – 2017. – Vol. 7. – No. 3. – P.73-90.

9. Assimi H., Jamali A. Sizing and topology optimization of truss structures using genetic programming // Swarm and Evolutionary Computation. – 2017. – Vol. 37. – P.90-103.

10. Овчинников И.Г. О задачах оптимального проектирования конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных сред // Изв. ВУЗов. Строительство и архитектура. – 1988. – № 9. – С.17-22.

11. Зеленцов Д.Г., Денисюк О.Р. Алгоритм решения задач оптимизации корродирующих конструкций на основе метода скользящего допуска // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 2 (28). – С.51-57.

12. Ashlock D. Evolutionary Computation for Modeling and Optimization. – New York: Springer. – 2006. – 572 p.

13. Зеленцов Д.Г., Новикова Л.В., Денисюк О.Р. Математические модели сечений элементов шарнирно-стержневых конструкций, подверженных воздействию агрессивных сред // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2015. – № 2 (53). – С.146-151.

14. Himmelblau D.M. Applied nonlinear programming. – McGraw-Hill. – 1972. – 498 p.

Поступила в редакцию 15.10.2017

ЗАСТОСУВАННЯ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ В ЗАДАЧАХ ДИСКРЕТНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ КОРОДУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ**Денисюк О.Р., Борзов С.О.**

У роботі запропоновано новий ефективний алгоритм розв'язання задач оптимального проектування кородуючих шарнірно-стержневих конструкцій, що передбачає отримання розв'язку із заданою точністю. При вирішенні оптимізаційної задачі потрібно визначити параметри перерізів елементів таким чином, щоб обсяг конструкції був мінімальним, і протягом заданого терміну експлуатації вона зберігала несучу здатність, тобто задовольняла обмеженням по міцності і стійкості. Обчислення функцій обмежень передбачає чисельне розв'язання системи диференціальних рівнянь, що описують процес корозії в елементах конструкції. Вплив механічної напруги на швидкість корозії передбачає вирішення задачі напружено-деформованого стану в кожному вузлі часової сітки, що призводить до підвищених вимог до ефективності обчислювального алгоритму. Шарнірно-стержневі конструкції виготовляються з прокатних профілів, розміри перетинів яких регламентовані стандартами. У зв'язку з цим пошук рішення здійснювався на дискретній неметричній множині варіюваних параметрів. Оптимізаційний алгоритм побудований на основі стратегії ковзного допуску спільно з дійсним цілочисельним генетичним алгоритмом. Використання методу ковзного допуску дозволяє змінювати точність розв'язку на різних етапах розв'язання оптимізаційної задачі з використанням генетичного алгоритму. Для забезпечення необхідної точності обчислення функцій обмежень в околі екстремуму використовується штучна нейронна мережа, що апроксимує залежність між параметрами конструкції, допустимою похибкою рішення (критерієм ковзного допуску) і параметрами обчислювальних процедур. Аналіз ефективності розробленого алгоритму, який використовує в якості критерію ефективності кількість звернень до процедури методу скінченних елементів в процесі пошуку оптимального рішення, продемонстрував істотне зниження обчислювальних витрат у порівнянні з відомими алгоритмами.

Ключові слова: оптимальне проектування, дискретна оптимізація, генетичний алгоритм, метод ковзного допуску, нейронна мережа, корозія.

UTILIZATION OF GENETIC ALGORITHMS IN PROBLEMS OF DISCRETE OPTIMIZATION OF CORRODING STRUCTURES**Denysiuk O.R., Borzov S.A.**

The paper proposes a new efficient algorithm to solve the problems of corroding hinged-rod structures optimal design, which involves obtaining solutions with given accuracy. When solving the optimization problem, it is required to determine the parameters of cross-sections of elements in such way that the volume of the structure is minimal, and for a given period of operation it retains its carrying capacity, that is, it satisfies the constraints on strength and stability. Calculation of the constraint functions involves a numerical solution of the system of differential equations describing the process of corrosion in structural elements. The effect of mechanical stresses on the rate of corrosion involves solving the problem of the stress-strain state at each node of the time grid, which leads to increased requirements for the efficiency of the computational algorithm. Hinged-rod structures are made of rolling profiles; the dimensions of sections of these profiles are regulated by standards. Therefore the search for solution is made in a discrete non-metric space of varied parameters. The optimization algorithm is based on use of flexible tolerance strategy together with integer-valued real genetic algorithm. Use of the flexible tolerance method allows to change the accuracy of a

solution at different stages when solving the optimization problem using the genetic algorithm. To ensure the required accuracy of the restrictions function computation in the vicinity of an extremum an artificial neural network approximating the relationship between structure parameters, permissible error of solution (flexible tolerance criterion) and parameters of computational procedures is used. The analysis of effectiveness of the developed algorithm, which used the number of calls to the procedure of the finite element method in the process of searching for the optimal solution as the efficiency criterion, demonstrated a significant decrease in computational costs in comparison with the known algorithms.

Keywords: optimal design, discrete optimization, genetic algorithm, flexible tolerance method, neural network, corrosion.

REFERENCES

1. Zelentsov D.G., Liashenko O.A., Naumenko N.Yu. *Informatsionnoe obespechenie raschetov korrodiruyuschiy ob'ektov. Matematicheskie modeli i kontseptsiya proektirovaniya system* [Information support for calculation of corroding objects. Mathematical models and the concept of systems design]. Dnepropetrovsk: Ukrainian State University of Chemical Technology Publ., 2012, 264 p. (in Russian).
2. Zelentsov D.G., Korotkaya L.I. Neyronnyie seti kak sredstvo modifikatsii metoda skolzyashchego dopuska [Neural networks as a means of modifying the flexible tolerance method of sliding tolerance]. *Eastern-European Journal of Journal of Enterprise Technologies*, 2011, vol. 4/4 (52), pp. 21-24. (in Russian).
3. Zelentsov D.G., Novikova L.V., Naumenko N.Yu. Algoritm upravleniya tochnostyu chislennogo resheniya nekotorykh klassov sistem differentsialnykh uravneniy [An algorithm of numerical solution accuracy control for certain classes of systems of differential equations]. *System technologies*, 2012, vol. 5 (82), pp. 71-79. (in Russian).
4. Zelentsov D.G., Filatov G.V. Obzor issledovaniy po primeneniyu metodov nelineynogo matematicheskogo programmirovaniya k optimalnomu proektirovaniyu konstruktivnykh, vzaimodeystvuyuschiy s agressivnoy sredoy [A review of research on the application of methods of nonlinear mathematical programming to the optimal design of structures interacting with an aggressive medium]. *Issues of Chemistry and Chemical Technology*, 2002, vol. 4, P.108-115. (in Russian).
5. Zelentsov D.G., Naumenko N.Yu. Adaptatsiya metoda skolzyashchego dopuska k zadacham optimizatsii korrodiruyuschiy konstruktivnykh [Adaptation of the flexible tolerance method to the problems of corroding structures optimization]. *System technologies*, 2005, vol. 2(37), pp. 48-56. (in Russian).
6. Cazacu R., Grama L. Steel Truss Optimization Using Genetic Algorithms and FEA. *Procedia Technology*, 2012, vol. 12, pp. 339-346.
7. Azad S. K., Kulnarni A. J. Structural optimization using a mutation-based genetic algorithm. *Iran University of Science & Technology*, 2012, vol. 2, no. 1, pp. 81-101.
8. Webb D., Alobaidi W., Sandgren E. Structural Design via Genetic Optimization. *Modern Mechanical Engineering*, 2017, vol. 7, no. 3, pp. 73-90.
9. Assimi H., Jamali A. Sizing and topology optimization of truss structures using genetic programming. *Swarm and Evolu-*

tionary Computation, 2017, vol. 37, pp. 90-103.

10. Ovchinnikov I.G. O zadachakh optimalnogo proektirovaniya konstruktsey, podvergayuschihsva vozddeystviyu agresivnyh sred [On the problems of optimal design of structures exposed to aggressive media]. *Stroitelstvo i arkhitektura*, Izv. VUZov., 1988, vol. 9, pp. 17-22.

11. Zelentsov D.G., Denysiuk O.R. Algoritm resheniya zadach optimizatsii korrodiruyuschih konstruktsey na osnove metoda skolzyashchego dopuska [Algorithm of solving corroding construction optimization problems based on flexible tolerance method]. *Technology audit and production reserves*, 2016, vol. 2(28), pp. 51-57. (in Russian).

12. Ashlock D. *Evolutionary Computation for Modeling and Optimization*. Springer, New York 2006. 572 p.

13. Zelentsov D.G., Novikova L.V., Denysiuk O.R. Matematicheskie modeli secheniy elementov sharnirno-sterzhnevyykh konstruktsey, podverzhennyh vozddeystviyu agresivnyh sred [Mathematical models of the cross-sections of elements of hinged-rod structures subjected to the influence of aggressive media]. *Vestnik Khersonskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, vol. 2 (53), pp. 146-151. (in Russian).

14. Himmelblau D.M. *Applied nonlinear programming*. McGraw-Hill, 1972. 498 p.

УДК 539.3

Дисковский А.А., Малая Ю.А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ С ОТВЕРСТИЕМ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ

Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина

Для исследования влияния произвольного свободного отверстия на частоты собственных колебаний прямоугольных пластин используется вариационный принцип Рейсснера. Прогиб и моменты аппроксимируются независимо друг от друга R -функциями с неопределенными параметрами так, чтобы выполнялись граничные условия на краях пластинки. Граничные условия на свободном отверстии приняты в форме, предложенной Пуассоном. Предлагаемый алгоритм был реализован для определения влияния свободного центрального кругового отверстия в квадратной пластинке на основной тон ее колебаний. При этом для простоты в разложениях было оставлено по одной аппроксимирующей функции. Результаты были сравнены с результатами, полученными в работе Р. Негарта и Т. Ариман. Наибольшее расхождение, около 16%, имеет место при малых отверстиях, с увеличением размера отверстия оно падает до 10%. С целью проверки реализованного алгоритма была решена тестовая задача определения собственной частоты сплошной шарнирно опертой квадратной пластинки. Расхождение результатов с точным решением составило меньше 2%. Предложенный алгоритм определения собственной частоты колебаний прямоугольных пластин со свободным отверстием имеет ряд преимуществ по сравнению с методами, использованными в работах У. Кристенсана, В. Соедела и Р. Негарта. Например, он не накладывает ограничений на размер, форму и расположение отверстия, легко распространяется на случаи нескольких отверстий и других условий закрепления пластины и отверстия. При этом, необходимо отметить недостаток, который имеет место при использовании принципа Рейсснера в задачах о колебаниях. В то время как метод Рэлея-Ритца дает значение частот, которые больше соответствующих точных значений, принцип Рейсснера этого не гарантирует. Вычисленные частоты могут быть больше или меньше точных значений и нет никаких приемов, позволяющих определить знак этого отклонения.

Ключевые слова: прямоугольная пластина, свободное отверстие, собственные частоты, принцип Рейсснера, R -функции.

Постановка проблемы

Прямоугольные пластины с вырезами (отверстиями) достаточно широко используются в конструкциях ракетной и авиационной техники, судостроении, строительных сооружениях и машин. Одной из основных задач при расчете вибрационных характеристик таких элементов конструкций, особенно на этапе проектирования, является определение частот свободных колебаний. В настоящее время изучены только частные случаи с отверстиями определенной формы и расположения. Поэтому разработка алгоритма позволяющего исследовать влияние отверстия произвольной формы на частоты соб-

ственных колебаний представляется актуальной.

Анализ последних исследований и публикаций

Решению вопроса о влиянии вырезов различной формы на собственные частоты колебаний прямоугольных пластин посвящено большое количество работ. В частности, в работе [1] с помощью метода Бубнова-Галеркина исследовано влияние вырезов на собственные колебания тонкой упругой прямоугольной пластины. Были определены низшие частоты для пластин ослабленных центральным вырезом квадратной, прямоугольной, круглой и овальной формы. С использованием балочных функций колебаний в работе [2] определены собствен-

ные частоты прямоугольной пластины с центральным прямоугольным вырезом при произвольном закреплении кромок пластины. В работе [3] рассматриваемая задача решалась методом Рэлея-Ритца. Следует отметить, что решение таких задач традиционными методами Рэлея-Ритца или Бубнова-Галеркина сопряжено со значительными трудностями, связанными с выбором аппроксимирующих функций для прогиба, удовлетворяющих граничным условиям [4]. Поэтому много исследований в этом направлении выполнялись экспериментально [5,6] или теоретико-экспериментальным методом [7]. Объектом испытаний в этих работах являлись квадратные пластины с защемленными краями, поскольку такие граничные условия наиболее просто реализуются экспериментально. Собственные колебания шарнирно-опертых квадратных пластин с центральным круговым отверстием, свободным от напряжений, исследовались в работе [8]. Однако результаты, полученные в этой работе, ограничены случаями сравнительно малых отверстий: $r/a \leq 0,3$ (a — длина стороны пластинки, r — радиус отверстия).

Формулирование целей статьи (постановка задачи)

В данной работе для исследования влияния произвольного свободного отверстия на частоты собственных колебаний прямоугольных пластин (рис. 1) предлагается использовать вариационный принцип Рейсснера.

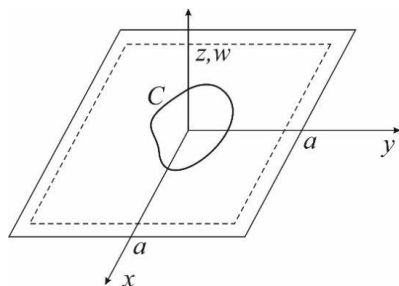


Рис. 1. Квадратная шарнирно-опертая пластинка со свободным отверстием

Этот принцип был успешно применен в работе [9] к задачам об изгибе и колебаниях сплошной консольной пластины. Можно ожидать, что подобный метод будет также эффективен и для решения рассматриваемой задачи, поскольку основные особенности исследования собственных колебаний консольной и многосвязной пластинок (необходимость удовлетворения различных граничных условий на разных участках контура) совпадают.

Изложение основного материала исследования

В случае собственных колебаний принцип Рейсснера для тонких пластин [9] имеет вид:

$$\delta \left\{ \iint_A \left[-M_x \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} - M_y \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + 2M_{xy} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} - \frac{(M_x^2 + M_y^2 + 2(1+\nu)M_{xy}^2)}{2(1-\nu^2)} - \frac{\Omega^2 \rho}{2} \omega^2 \right] dx dy - \int_C \left[M_n \frac{\partial \omega}{\partial n} + \left(\frac{\partial M_n}{\partial n} + 2 \frac{\partial M_{nt}}{\partial t} \right) \omega \right] dt \right\} = 0, \quad (1)$$

где $D = \frac{Eh^2}{12(1-\nu^2)}$; E — модуль упругости; ν — коэффициент Пуассона; Ω — круговая частота; ρ — плотность массы на единицу площади.

Вариационное уравнение (1) эквивалентно дифференциальным уравнениям равновесия пластинки, физическим соотношениям упругости и статистическим граничным условиям на контуре отверстия C .

Уравнение (1) используется для приближенного определения собственной частоты колебаний следующим образом. Прогиб и моменты аппроксимируются независимо друг от друга функциями с некоторым числом неопределенных параметров в каждом выражении так, чтобы выполнялись граничные условия на краях пластинки. Подставляя эти выражения в вариационное уравнение (1) и производя варьирование, получаем алгебраическую систему линейных однородных уравнений относительно параметров. Приравняв определитель этой системы нулю, находим уравнение для определения собственной частоты.

Успех описанного метода зависит от того, насколько удачно предложенные функции для прогиба и моментов аппроксимируют истинные функции при соответствующем выборе неопределенных параметров. Поэтому для улучшения сходимости вычислительного процесса целесообразно подчинить аппроксимирующие функции также и граничным условиям на контуре отверстия. При этом в вариационном уравнении исчезает криволинейный интеграл и исходная система уравнений существенно упрощается.

Граничные условия для шарнирно-опертой квадратной пластинки со свободным отвер-

стием (рис. 1) возьмем в следующем виде:

при $\xi^2=1$, $\omega=0$, $M_x=0$; при $\eta^2=1$, $\omega=0$, $M_y=0$; (2)

на контуре отверстия С:

$$M_n = M_\xi \cos^2 \varphi + M_\eta \sin^2 \varphi - \\ - M_{\xi\eta} \cos \varphi \cdot \sin \varphi = 0;$$

$$M_{nt} = M_{\xi\eta} (\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi) + \\ + (M_\xi - M_\eta) \cos \varphi \cdot \sin \varphi = 0;$$

$$Q_n = \left(\frac{\partial M_{\xi\eta}}{\partial \eta} + \frac{\partial M_\xi}{\partial \xi} \right) \cos \varphi + \\ + \left(\frac{\partial M_\eta}{\partial \eta} - \frac{\partial M_{\xi\eta}}{\partial \xi} \right) \sin \varphi = 0, \quad (3)$$

где $\xi = \frac{2x}{a}$, $\eta = \frac{2y}{a}$, φ – угол между осью x и нормалью к контуру отверстия С.

Здесь приняты граничные условия на свободном отверстии (3) в форме, предложенной Пуассоном. Отказ от киргофовских граничных условий вызван тем, что принятые граничные условия можно разрешить относительно M_ξ , M_η , $M_{\xi\eta}$. В результате получим, что на границе отверстия:

$$M_\xi = M_\eta = M_{\xi\eta} = 0. \quad (4)$$

Прогиб и моменты выгодно представить следующими выражениями, удовлетворяющими граничными условиями:

$$\omega = \omega_1 \sum_{n=1}^k c_{1n} \varphi_{1n}; \quad M_\xi = \omega_2 \sum_{n=1}^k c_{2n} \varphi_{2n}; \\ M_\eta = \omega_3 \sum_{n=1}^k c_{3n} \varphi_{3n}; \quad M_{\xi\eta} = \omega_4 \sum_{n=1}^k c_{4n} \varphi_{4n}, \quad (5)$$

здесь $\omega_i=0$ на тех участках границы, где этого требует выполнение граничных условий (2), (3); φ_{in} – некоторые выбранные заранее аппроксимирующие функции; c_{in} – произвольные постоянные. Используя для построения ω_i – функции Рвачева [10], [11] нетрудно удовлетворить

граничным условиям пластинки с отверстием произвольной формы.

Описанный выше алгоритм был реализован для определения влияния свободного центрального кругового отверстия в квадратной пластинке на основной тон ее колебаний. При этом для простоты в разложениях (5) было оставлено по одной аппроксимирующей функции:

$$\omega = c_1 \cos \frac{\pi \xi}{2} \sin \frac{\pi \eta}{2};$$

$$M_\xi = c_{21} (\xi^2 - \eta^2 - R^2) \cos \frac{\pi \xi}{2} \sin \frac{\pi \eta}{2};$$

$$M_\eta = c_3 (\xi^2 + \eta^2 - R^2) \cos \frac{\pi \xi}{2} \sin \frac{\pi \eta}{2};$$

$$M_{\xi\eta} = c_4 (\xi^2 + \eta^2 - R^2) \sin \frac{\pi \xi}{2} \sin \frac{\pi \eta}{2}. \quad (6)$$

Результаты были сравнены с результатами, полученными в работе [8] (рис. 2). Наибольшее расхождение, около 16%, имеет место при малых отверстиях, с увеличением размера отверстия оно падает до 10%. Это объясняется тем, что принятая аппроксимация моментов (6) не обеспечивает предельного перехода к сплошной пластине. Но, поскольку в работе [8] получена оценка собственной частоты сверху то, очевидно, истинная погрешность полученных результатов будет ниже указанного расхождения.

С целью проверки реализованного алгоритма была решена тестовая задача определения собственной частоты сплошной шарнирно-опертой квадратной пластинки. При этом ее прогиб и моменты аппроксимировались следующими выражениями:

$$\omega = c_1 \sin \frac{N\pi \xi}{2} \sin \frac{N\pi \eta}{2};$$

$$M_\xi = c_2 \cos \frac{N\pi \xi}{2} \cos \frac{N\pi \eta}{2};$$

$$M_\eta = c_3 \cos \frac{N\pi \xi}{2} \sin \frac{N\pi \eta}{2};$$

$$M_{\xi\eta} = c_4 \sin \frac{N\pi \xi}{2} \sin \frac{N\pi \eta}{2}. \quad (7)$$

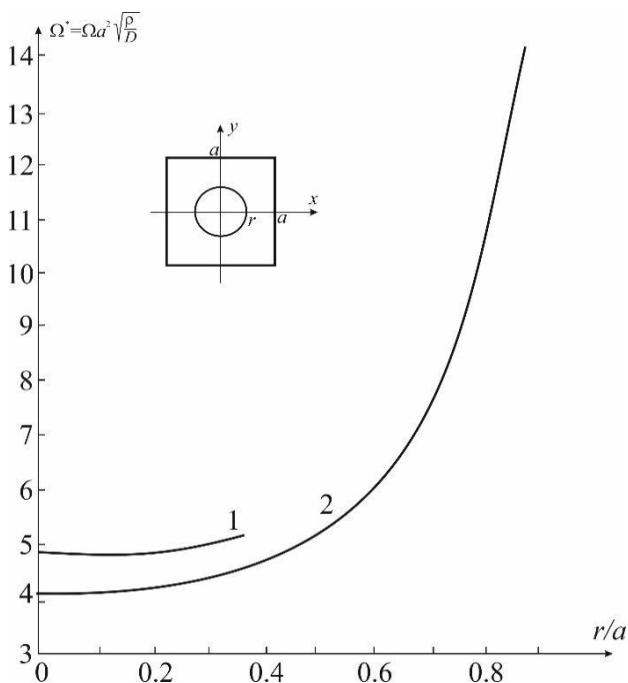


Рис. 2. Зависимость основной частоты собственных колебаний пластины от радиуса отверстия: 1 – результат работы [4]; 2 – результаты авторов

Расхождение результатов с точным решением составило меньше 2%.

Выводы

Предложенный алгоритм определения собственной частоты колебаний прямоугольных пластин со свободным отверстием имеет ряд преимуществ по сравнению с методами, использованными в работах [1–4]. Он не накладывает ограничений на размер, форму и расположение отверстия, легко распространяется на случаи нескольких отверстий и других условий закрепления пластины и отверстия. При этом, необходимо отметить недостаток, который имеет место при использовании принципа Рейснера в задачах о колебаниях. В то время как метод Рэлея-Ритца дает значение частот, которые больше соответствующих точных значений, принцип Рейснера этого не гарантирует [9]. Вычисленные частоты могут быть больше или меньше точных значений и нет никаких приемов, позволяющих определить знак этого отклонения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казачек Ю.Н. Собственные колебания прямоугольной пластины ослабленной вырезом // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Общая и прикладная механика. – 2011. – № 4 (2). – С.165-166.
2. Завьялов В.Н., Романовский В.М. Определение частот собственных колебаний прямоугольных пластин с прямоугольными вырезами // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – Омск, 2011. – Вып. 1 (19). – С.37-39.
3. Сафронов В.С. Исследование частот собственных колебаний и плоской трехслойной сотовой пластины с отверстием // Авиакосмическое приборостроение. – 2014. – № 9. – С.19-26.
4. Москаленко Л.В. Колебания пластин с вырезами и трещиной // Научный вестник МГТУ ГА. – 2005. – № 85. – С.21-26.
5. Kristiansen U., Soedel W. Fundamental of cutout square plates with clamped edges // J. Eng. Ind. – 93 (1). – 1971. – P.343-345.
6. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. – Москва: КомКнига, 2006. – 440 с.
7. Коноплев Ю.Г., Шишкин А.Г. Собственные колебания прямоугольных пластин с вырезами // Труды 9 Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин. – Ленинград: Судостроение. – 1975. – С.54-62.
8. Hegarty R.F., Ariman T. Elasto-dynamic analysis of rectangular plates with circular holes // International Journal of Solids and Structures. – 11 (7-8). – 1975. – p. 895-906.
9. Пласс Г., Гейне Дж., Ньюсом К. Применение вариационного принципа Рейснера к изгибу и колебаниям консольной пластины // Прикладная механика, труды амер. общества инж.-механиков, русс. перевод, серия Е. – 1962. – т. 29. – № 1. – С.43-54.
10. Чопоров С.В., Лисняк А.А., Гоменюк С.И. Использование функций В.Л. Рвачева для геометрического моделирования областей сложной формы // Прикладная информатика. – 2010. – № 2 (26). – С.109-122.
11. Максименко-Шейко К.В. R-функции в математическом моделировании геометрических объектов и физических полей / К.В. Максименко-Шейко – Харьков: ИПМаш НАН Украины. – 2009. – 306 с.

Поступила в редакцию 08.10.2017

МОДЕЛЮВАННЯ ВІЛЬНИХ КОЛИВАНЬ ПРЯМОКУТНОЇ ПЛАСТИНИ З ОТВОРОМ ДОВІЛЬНОЇ ФОРМИ**Дисковський О.А., Мала Ю.А.**

Для дослідження впливу довільного вільного отвору на частоти власних коливань прямокутних пластин використано варіаційний принцип Рейсснера. Прогин і моменти апроксимуються незалежно один від одного R -функціями з невизначеними параметрами так, щоб виконувалися граничні умови на краях пластини. Граничні умови на вільному отворі прийняті у формі, які запропоновані Пуассоном. Пропонований алгоритм був реалізований для визначення впливу вільного центрального кругового отвору в квадратній пластині на основний тон її коливань. При цьому для простоти в розкладаннях було залишено по одній апроксимуючій функції. Результати були порівняні з результатами, які отримані в роботі Р. Негарта і Т. Арімана. Найбільша розбіжність, близько 16% має місце при малих отворах, зі збільшенням розміру отвору вона падає до 10%. З метою перевірки реалізованого алгоритму була розв'язана тестова задача визначення власної частоти суцільної шарнірно-опертої квадратної пластинки. Розбіжність результатів з точним розв'язком склало менше 2%. Запропонований алгоритм визначення власної частоти коливань прямокутних пластин з вільним отвором має низку переваг в порівнянні з методами, які були використані в роботах У. Крістенсана, В. Соєдела і Р. Негарта. Наприклад, він не накладає обмежень на розмір, форму і розташування отвору, легко поширюється на випадки декількох отворів і інших умов закріплення пластини і отвору. При цьому, необхідно відмітити недолік, який має місце при використанні принципу Рейсснера в задачах про коливання. У той час як метод Релея-Рітца дає значення частот, які більше відповідних точних значень, принцип Рейсснера цього не гарантує. Обчислені частоти можуть бути більше або менше точних значень і немає ніяких прийомів, що дозволяють визначити знак цього відхилення.

Ключові слова: прямокутна пластина, вільний отвір, власні частоти, принцип Рейсснера, R -функції.

FREE VIBRATIONS MODELING OF THE RECTANGULAR PLATE WITH AN ARBITRARY FROM HOLE**Diskovskiy O.A., Mala Yu.A.****National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine**

The Reissner variations principle is used to study influence of an arbitrary hole on the frequencies of rectangular plate. Deflection and moments are approximated independently through the R -functions with a few (not defined yet) parameters in order to satisfy boundary conditions on the plate edges. The boundary conditions on contour hole are considered in form proposed by Poisson. The described algorithm has been realized numerically to study influence of the free central circle hole localized in a square plate on its fundamental frequency of vibration. For simplicity, we have used only one approximating functions in the series. Our results have been compared with those obtained by R. Hegarty and T. Ariman. The largest error on amount of 16% occurs for small holes; increase of the hole size decreases the error to 10%. In order to validate the proposed algorithm, a test problem is solved to define the fundamental frequency of the continuous simply supported square plate. A difference comparing with the exact result achieved less than 2%. It should be emphasized that the proposed algorithms of the estimation of fundamental frequency of vibrations of the rectangular plates with free hole has numerous advantages in comparison to the methods used in works by U. Kristiansen, W. Soedel and R. Hegarty. Namely, it does not introduce any limits on the dimensions, form and location of a hole, and can be extended to study a case with several holes and other boundary conditions for the plate and hole. There is, however, one

drawback while applying the Reissner principle to the problems of vibrations. In the contrary to the Rayleigh-Ritz method, which allows to estimate frequencies located over their exact values, the Reissner method cannot guarantee this. In words, the obtained frequencies can be either larger or smaller than the exact values, and there is no way to estimate a sign of this deviation.

Keywords: rectangular plate, arbitrary hole, fundamental frequency of vibration, Reissner principle, R -functions.

REFERENCES

1. Kazachek Yu.N. *Sobstvennyye kolebaniya pryamougol'noy plastiny oslablennoy vrezom*. [Natural oscillations of rectangular plates weakened by cuts]. Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. Obschaya i prikladnaya mehanika, 2011, № 4 (2), pp. 165-166. (in Russian).
2. Zavyalov V.N., Romanovsky V.M. *Opredeleniye chastot sobstvennykh kolebaniy pryamougol'nykh plastin s pryamougol'nymi vrezami* [The definition of own frequency oscillations the rectangular plates with holes]. Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobilno-dorozhnoy akademii, Omsk, 2011, vol. 1 (19), pp. 37-39. (in Russian).
3. Safronov V.S. *Issledovaniye chastot sobstvennykh kolebaniy y ploskoy trekhsloynoy sotovoy plastiny s otverstiyem* [Study of the frequency of natural oscillations of the flat three-layer mobile plate with holes]. Aviakosmicheskoye priborostroyeniye, 2014, № 9, pp. 19-26. (in Russian).
4. Moskalenko L.V. *Kolebaniya plastin s vrezami i treshchinoy* [Rippling of a rectangular plate with an aperture or crack]. Nauchnyy vestnik MGTU GA, 2005, № 85, pp. 21-26. (in Russian).
5. Kristiansen U., Soedel W. *Fundamental of cutout square plates with clamped edges*. J. Eng. Ind., 93 (1), 1971, pp. 343-345.
6. Timoshenko S.P. *Kolebaniya v inzhenernom dele*. [Oscillations in Engineering]. Moscow, KomKniga, 2006, 440 p. (in Russian).
7. Konoplev Yu.G., Schischkin A.G. *Sobstvennyye kolebaniya pryamougolnykh plastin s vrezami* [Own oscillations of rectangular plates with notches]. Leningrad, Sudostrojenye, 1975, pp. 54-62. (in Russian).
8. Hegarty R.F., Ariman T. *Elasto-dynamic analysis of rectangular plates with circular holes*. International Journal of Solids and Structures, 11(7-8), 1975, pp. 895-906.
9. Plass G., Geyne Dzh., Nyusom K. *Primenenie variatsionnogo printsipa Reysnera k izgibu i kolebaniyam konsolnoy plastiny* [Application of the Reissner variational principle to the problems of bending and clawing of the cantilever plate]. Prikladnaya mehanika, trudy amer. obschestva inzh.-mekhanikov, russ. perevod, seriya E, 1962, 29 (1), pp. 43-54. (in Russian).
10. Choporov S.V., Lisnyak A.A., Gomenyuk S.I. *Ispol'zovaniye funktsiy V.L. Rvacheva dlya geometricheskogo modelirovaniya oblastey slozhnoy formy* [Using the functions of V.L. Rvachev for geometric modeling of regions of complex shape]. Applied Informatics, 2010, № 2 (26), pp. 109-122. (in Russian).
11. Maksimenko-Sheiko K.V. *R-funktsii v matematicheskoy modelirovaniy geometricheskikh ob'yektov i fizicheskikh poley* [R-functions in mathematical modeling of geometric objects and physical fields]. Kharkov: IPMash NAS of Ukraine, 2009, 306 p. (in Russian).

Zelentsov D.G., Liashenko O.A.

DECOMPOSITION METHOD FOR SOLVING SYSTEMS OF DIFFERENTIAL EQUATIONS FOR THE PROBLEMS OF MODELLING CORROSION DEFORMATION PROCESSES

Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

The article offers and justifies a method for solving systems of differential equations (SDE) that simulate time changes of stress and strain state due to the influence of corrosive environment (the process of corrosion deformation). The objective of modelling is the determination of the construction durability that is the time of its flawless operation. The finite element model of the object under study determines dimension of SDE modelling the process of corrosion deformation. The right-hand sides of the differential equations contain functions of mechanical stresses. The finite element method is used to calculate stresses. The proposed decomposition method is based on the transformation of the initial differential equations by introducing functions describing the influence of the remaining equations and the subsequent solution of one of these equations. Based on the analysis of the factors influencing the stress change in the area of the given finite element, we propose to introduce into the corresponding differential equation a function approximating the change of internal forces over time. In this case, the discrepancy between the results of the initial SDE solution and an individual equation is determined only by the error in approximating the dependence of the internal force on time. The article shows that this allows a multi-rate reduction of computational costs. In addition, for a numerical solution of SDE, we propose to use a modified algorithm of the Euler method with a variable integration step by argument. The result of the solution is determination of corrosive construction durability, i.e. operating time before exhaustion of bearing capacity. To illustrate the proposed method, we solved the problem of calculating the durability of a flat-plate subjected to corrosive wear. The article provides the results of numerical experiments confirming the accuracy of the proposed numerical solution with minimal computational costs. The decomposition method for solving SDE, modelling the process of corrosion deformation of plane-stressed plates, can be generalized to other classes of constructions.

Keywords: decomposition method, corrosive medium, process of corrosion deformation, system of differential equations, plane-stress corroding plates.

Statement of the problem

When solving practical problems associated with the finite element modelling of the corrosion deformation process and predicting the durability of metal constructions operating in corrosive environments (CE), the problem of accuracy and efficiency of computational methods and algorithms becomes particularly important. In the general case, modelling of changes in stress and strain state of a construction in time due to the physical and chemical processes occurring in its elements assumes a numerical solution of the Cauchy problem for systems of differential equations (SDE) describing the accumulation of geometric damages. The finite

element model of the object under study determines the dimension of the SDE. The increase in accuracy due to the increase in the number of nodes of the time grid leads to a sharp increase in computing costs. In this article, we propose and justify the method of solving SDE, based on the decomposition of the system and allowing to achieve high accuracy of the numerical solution with minimal computational costs.

Analysis of recent research and publications

At the initial development stage of Corrosive Structure Mechanics as an independent direction of Construction Mechanics most works practically do not pay attention to analyzing the accuracy of the

obtained results. At best, only the method of solving SDE is indicated [1]. Such a disregard for numerical methods, and, especially, for estimation of their accuracy, is probably caused by the fact that authors were interested only in qualitative estimates.

The paper [2] should be considered one of the first works, which gives recommendations for choosing the parameters of the numerical solution for SDE in the study of corroding plates. It was proposed to take the length of the integration step in time not more than 1/200 of the plate thickness ratio to the corrosion rate in the absence of stresses. These recommendations, however, do not take into account such important factors affecting inaccuracy of numerical solution as the value of stress at the initial time and the rate of stress changes. In addition, following these recommendations can lead to excessive computational costs in the study of multi-element constructions, especially for optimization problems.

In later works, the increase in the efficiency and accuracy of computational algorithms was provided due to their modification including the use of analytical dependencies between the parameters of the cross section and the corrosive environment, stress, limiting values of the corrosion depth and time [3]. However, quantitative estimates of the errors in solution were not given in these studies.

Obviously, one of the first papers devoted to improving the efficiency of numerical integration of systems of differential equations is [4]. In this paper, they used the method of dynamic programming for the problem of minimizing the number of arithmetic operations when integrating a system of ordinary differential equations of the n th order by controlling the length of the integration step.

The approach based on the formalization of information about the influence on solution inaccuracy (in addition to the length of the integration step) of such factors as the initial values of stresses in the element, parameters of corrosive environment and, for rod constructions, the characteristics of its cross-sections (shape, area, perimeter) is apparently more promising. This formalization was carried out with the help of artificial neural networks (ANN) [5,6] in the study of hinged-rod structures (HRS). With the obvious advantages of this approach, the question about the effect of the time variation of internal forces in finite elements on the accuracy of the obtained solution remained open.

The problem of the accuracy and efficiency of the numerical solution for SDE describing accumulation of geometric damages becomes especially important in problems of optimal design

for corrosive structures [7] where the calculation of the constraint functions involves determining the durability of the construction. It should be noted that methods for solving discrete optimization problems including genetic methods assume higher computational costs in comparison with methods of Mathematical Programming [8].

Research objective

We will consider plane-stressed plates subject to corrosive wear as an object of study. The task of modelling is the determination of the construction durability - the time of its trouble-free operation.

Due to the influence of a corrosive environment, the thickness of the plate decreases that, in turn, leads to an increase in mechanical stresses. If we take the depth of a corrosion damage as a parameter for corrosion action (damage parameter), the system of differential equations modelling the process of corrosion plate deformation can be presented as follows:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = v_0 \cdot F(\sigma_i(\bar{\delta})); \quad \delta_i|_{t=0} = 0; \quad i = \overline{1, N}. \quad (1)$$

Here: t – time; v_0 – corrosion rate in the absence of stress; σ – equivalent of stress; F – function describing the influence of stress over the rate of the corrosion process; N – number of elements in the finite element model.

The right-hand sides of the SDE contain the functions of mechanical stresses $F(\sigma)$. The following equations of Deformable Solid Mechanics are used to calculate stresses: the system of equations of equilibrium and deformation compatibility, the Cauchy relations and physical relationships (the Hooke's law for elastic bodies). As a system of equations for the finite element method (FEM) they look as follows:

$$\begin{cases} \bar{R} = K^{-1} \cdot \bar{u}; \\ \bar{\varepsilon} = D \cdot \bar{u}; \\ \bar{\sigma} = E \cdot \bar{\varepsilon}, \end{cases} \quad (2)$$

where K , D , E are the matrices of rigidity, differentiation and elasticity; $\bar{R}$, $\bar{u}$, $\bar{\varepsilon}$ and $\bar{\sigma}$ – vectors of nodal loads, displacements, deformations, and stresses.

Since the stress state is complex: $\bar{\sigma} = [\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}]^T$, in the right-hand side of the system (1), the stress intensity is taken as the equivalent stress σ_{eq} . Stresses are calculated in the center of finite element (FE) gravity. The structure loses its

bearing capacity when the stress in any of its elements reaches the maximum permissible value. The time moment corresponding to this state determines durability of the structure. Thus, the solution of the durability problem reduces to solving the Cauchy problem for a system (1) together with the solution of FEM problem (2). The calculation cycle is repeated until the structural capacity is exhausted.

Obviously, the system (1) can be solved only numerically and the solution of the FEM problem (2) is performed at each node of the time grid. This determines the level of computational costs which increases nonlinearly with FEM problem dimension growth and, as a consequence, the growth of SDE dimension.

Main material of the research

Stress changes in the finite elements are affected by two factors: the change in the thickness of these elements h_i and the change in their internal forces Q_i . The first factor is relatively easy to take into account, since the magnitude of the corrosion damage in the i th element is determined by the stress value only in this element. At a constant value of forces, SDE (1) degenerates into a simple set of unbound differential equations varying only in parameters.

$$\frac{d\delta_i}{dt} = v_0 \cdot F[\sigma_i(h_i(\delta_i), Q_i)]; \quad \delta_i \Big|_{t=0} = 0; \quad i = \overline{1, N}. \quad (3)$$

The durability of any element can be determined analytically, i.e. exactly (within the accepted model of corrosion wear). Thus, the solution of the durability prediction problem for statically plane-strained plates reduces to solving independent differential equations.

In the proposed algorithm for solving the durability problem, we use analytical formulas that determine the relationship between the thicknesses of FE, the initial and final stresses in them and parameters of corrosion wear.

Suppose that stress values are constant in D surroundings of some point (Fig. 1,a). It follows from the hypothesis of equivalent stress that the corrosion process in its vicinity occurs at the same rate as in the vicinity of the same point under the conditions of simple stressed state at $\sigma = \sigma_{eq}$ (Fig. 1,b).

To obtain a durability formula, we consider a plate fragment as a rod of rectangular cross section under uniaxial loading. As a model for accumulation of geometric damages, we take the following kinetic equation:

$$\frac{d\delta}{dt} = v_0 (1 + k\sigma), \quad (4)$$

where k – coefficient of stress influence on the rate of corrosion.

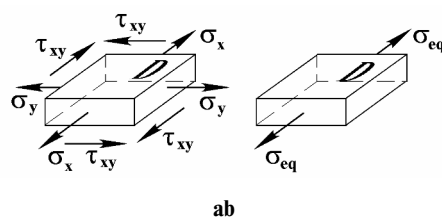


Fig. 1. Corrosion process under conditions of complex and simple stress state

Substantiation for the possibility of the equation (4) usage in modelling of processes of corrosion deformation is given in the monograph [3].

For a simple stress state, stresses in the element of $h(t)$ thickness in the area D are determined as follows:

$$\sigma_{eq}(t) = \frac{q_{eq}}{h(t)}, \quad (5)$$

where q_{eq} – intensity of the equivalent force in the plane of the element.

Differentiating (5) with respect to time after simple transformations for the damage accumulation model (4) we obtain a differential equation determining relationship between the initial and final equivalent stresses, the initial thickness of the element, the parameters of the corroding medium over time:

$$\frac{d\sigma_{eq}}{dt} = \frac{\sigma_{eq}^2}{\sigma_{eq0}} \cdot \frac{v_0}{h_0} (1 + k\sigma_{eq}). \quad (6)$$

By means of integration (6), we finally obtain:

$$t = \frac{h_0}{v_0} \sigma_{eq0} \left[k \ln \frac{\sigma_{eq0} (1 + k\sigma_{eq})}{\sigma_{eq} (1 + k\sigma_{eq0})} + \frac{\sigma_{eq} - \sigma_{eq0}}{\sigma_{eq} \sigma_{eq0}} \right]. \quad (7)$$

This solution can also serve as an approximate estimate for durability of statically indeterminate constructions. Its inaccuracy is determined by the degree of change in forces within the boundaries of the finite elements.

In statically indeterminate constructions, the force in a given element depends on time-varying thicknesses of all the elements. This is what determines relationship between equations of the system (1):

$$\begin{aligned} \frac{d\delta_i}{dt} &= v_0 \cdot F \left[\sigma_i \left(h_i(\delta_i), Q_i(\bar{\delta}) \right) \right]; \\ \delta_i \Big|_{t=0} &= 0; \quad i = \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (8)$$

In addition to parameters of corrosive wear, a large number of factors influence the character of the change in time including topology of the construction, its initial geometric parameters, boundary and loading conditions as well as the number of elements in the finite element model.

The idea of the method proposed by the authors is to create a function for the time variation of the force that allows to consider a separate differential equation instead of SDE (8) since this function allows to take into account influence of the remaining equations 2.

If dependence of force on time in the element which determines durability of the structure as a whole is formalized, then instead of a system of equations (8) it is sufficient to obtain a numerical solution of a single equation with any degree of accuracy since it is no longer necessary to solve the FEM problem to calculate the stresses. This considerably reduces computational costs. Discrepancy between a hypothetical exact solution of SDE (8) and a solution of one equation is determined only by the approximating error of the force and time dependence. On the other hand, a function approximating the dependence of the internal force on time can be created only as a result of solving SDE as mentioned above (8).

Accordingly, we offer to carry out the solution of the problem in two stages.

The first stage involves a numerical solution of SDE with a minimum number of nodal points for determining the number of the element which determines the construction durability and creating for it an approximating function of time variation of the force. As a result of the first stage realization, the approximate value of the structure durability $\tilde{\tau}$ is determined.

The results of numerical experiments lead to the conclusion that the third-degree polynomial quite accurately approximates the law of internal force variation. Therefore, in the time interval $[0; \tilde{\tau}]$ four node points are sufficient. Thus, at the first stage

the FEM problem is solved only four times.

The second stage includes transformation of a differential equation describing the corrosion process in the element with the shortest durability by means of introducing the resulting approximating function $Q=Q(t)$ into its right-hand part and then its numerical solution with the required accuracy. Its solution is a specified value of the structure durability.

Let us consider the algorithm for the numerical solution of Cauchy problem for the following SDE (8).

In most of the known works, one-step numerical methods of the Runge-Kutta type were used to solve SDE, most often the Euler's method. The disadvantages of these methods, in addition to low efficiency, are amply described in [3].

The main disadvantage of the methods used is that the abscissa of the intersection point of the function graph $\sigma=\sigma(t)$ with the line $\sigma^*=\sigma^*(t)$ is unknown; its definition is the result of solving the problem of forecasting durability. The arbitrary assignment of the integration step length (the distance between the nodes of the time grid) not only does not allow to control the accuracy of a numerical solution, but also not always provides the condition of its existence for all possible parameters of SDE.

This article offers to use the modified algorithm of the Euler's method with a variable integration step by the argument for the numerical solution of SDE (8) (Fig. 2). We suggest to specify the increment of the function $\Delta\sigma_s = \text{const}$ and determine the corresponding value of the argument increment Δt_s by the formula (7). The parameter of the computational procedure is the number of equidistant node points of the interval $[\sigma_0; \sigma^*]$.

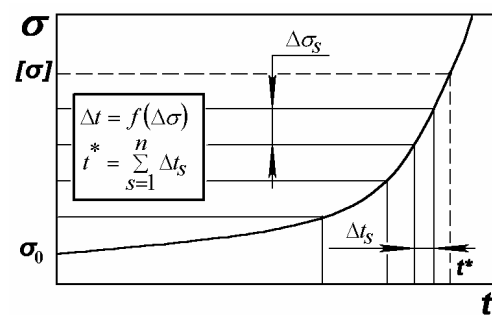


Fig. 2. Graphical illustration of computational algorithm

In this case, the condition for the existence of a numerical solution is satisfied for the entire domain of SDE parameter definition.

For a numerical illustration of the proposed method, consider a rectangular plate loaded in its

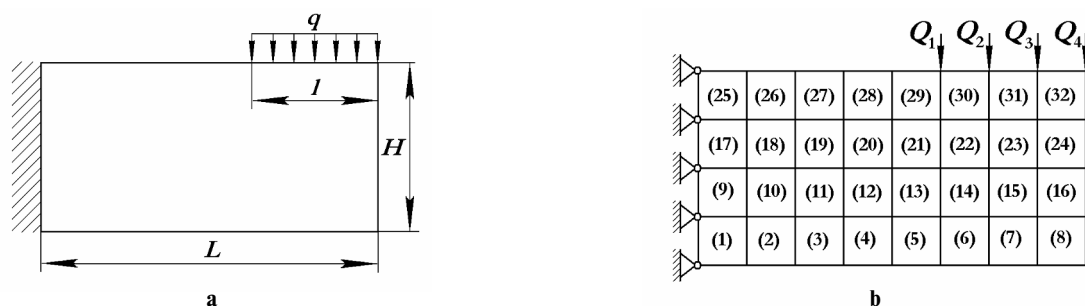


Fig. 3. The calculation scheme and the finite element model of the plate

plane by uniformly distributed load, and located in corrosive environment. The calculation scheme (a) and the finite element model (b) of the plate are presented in Fig. 3.

Parameters of the plate and corrosive medium were taken as follows:

- geometrical characteristics: $L=40$ cm; $H=20$ cm; $h_0=1,5$ cm;
- mechanical characteristics: $E=2,1 \times 10^5$ MPa; $\mu=0,3$; $\sigma^*=[\sigma]=240$ MPa;
- loading parameters: $q=40$ kN/cm; $l=15$ cm;
- parameters of corroding environment: $v_0=0,1$ cm/year; $k=0,003$ MPa $^{-1}$.

At the first stage, we determine the approximate value of the plate durability:

$$\tilde{t} = \min \{ \tilde{t}_1; \tilde{t}_2; \dots; \tilde{t}_{32} \}, \quad (9)$$

where $\tilde{t}_1; \tilde{t}_2; \dots; \tilde{t}_{32}$ represent durability of the elements found using formula (7) with a constant value of internal forces. The value found in this way is determined by the durability of the first element and amount to $\tilde{t}=3,8405$ years.

The obtained result is used to receive a calibration value of durability. The Cauchy problem for SDE (8) is solved by the Euler's method with recalculation. The distance between the nodes of the time grid is assumed to be equal to $\Delta t=0,005$, $\tilde{t}=0,0195$ years. The solution for the three last nodes of the time grid is refined with the parabolic method. The calibration value of the plate durability is $t_{et}=3,9731$ years. To obtain a calibration solution, the problem of calculating the stressed state of a

construction by the finite element method has been solved 204 times.

Some results obtained during the implementation of the first stage of the decomposition method are shown in Table. Here we provide the absolute values of forces and stresses (in parentheses) in structural elements.

At the second stage, the change in forces in the area of the first finite element of the structure is approximated with the third-degree polynomial using the data of the first four table rows.

The differential equation describing the process of corrosive destruction in the first element with the formalized dependence of the internal force on time is as follows:

$$\frac{d\delta}{dt} = v_0 \cdot \left(1 + k \cdot \frac{q_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \alpha_3 t^3}{h_0 - 2\delta} \right), \quad (10)$$

where a_1, a_2, a_3 – polynomial coefficients, h_0 – thickness of the plate while $t=0,0$.

The numerical solution of the equation (10) is obtained using the Euler's method with recalculation at $\Delta t=0,0195$ year. The obtained value of durability is $t^*=3,9562$ years. The error in solving the problem relative to the reference solution is $\approx 0,5\%$. At the same time, FEM problem is solved five times, i.e. the computational costs decrease by more than 40 times.

Conclusions

The decomposition method for solving systems

The results of the solution with the Euler's method with variable time step

t, years	q_{eq} , kN/cm (σ_{eq} , MPa)				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
0,0	10,825 (72,17)	8,587 (57,25)	5,795 (38,64)	4,027 (26,85)	4,383 (29,22)
2,173	10,693 (110,09)	8,529 (86,09)	5,776 (56,91)	4,042 (39,23)	4,426 (43,08)
3,161	10,520 (148,52)	8,456 (113,96)	5,750 (73,39)	4,059 (50,15)	4,480 (55,72)
3,715	10,315 (188,11)	8,371 (141,04)	5,718 (88,16)	4,077 (59,77)	4,543 (67,32)
4,077	10,302 (238,50)	8,364 (168,68)	5,683 (101,93)	4,098 (68,63)	4,581 (78,58)

of differential equations modelling the process of corrosion deformation for plane-strained plates presented in this article can be generalized to other classes of constructions. According to the authors, the most promising usage of this method is represented in solving problems of optimal structure design with limitation on durability. In this case, the task of determining the durability is solved at each iteration of the search for the optimal project that leads to large computational costs. The application of the decomposition method solves the problem with minimal computational costs and high accuracy.

REFERENCES

1. Петров В.В., Овчинников И.Г., Шихов Ю.М. Расчёт элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой. — Саратов: Сарат. ун-т, 1987. — 288 с.
2. Карпунин В.Г., Клещев С.И., Корнишин М.С. К расчёту пластин и оболочек с учетом общей коррозии. // Труды X Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин. — Тбилиси: Мецниереба, 1975. — Том 1. — С.166-174.
3. 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.
4. Коротченко А.Т. О применении метода динамического программирования к оптимальному интегрированию системы дифференциальных уравнений. // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Всесоюзн. межвуз. сб. — Горький: ГГУ, 1976. — вып. 4. — С.95-97.
5. 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.
6. Денисюк О.Р. Определение рациональных параметров численного решения систем дифференциальных уравнений // Вестник Херсонского национального технического университета. — 2016. — № 3 (58). — С.208-212.
7. Alapati M. Discrete Optimization of Truss Structure Using Genetic Algorithm // International Journal of Recent Development in Engineering and Technology. — 2014. — Vol. 3, Issue 1. — P.105-111.
8. Ashlock D. Evolutionary Computation for Modeling and Optimization. — New York: Springer, 2006. — 572 p.

Received 20.09.2017

ДЕКОМПОЗИЦИОННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ СИСТЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ В ЗАДАЧАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КОРРОЗИОННОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Зеленцов Д.Г., Ляшенко О.А.

В настоящей работе предлагается и обосновывается метод решения систем дифференциальных уравнений (СДУ), моделирующих процесс изменения во времени напряжённо-деформированного состояния конструкций вследствие воздействия агрессивных сред (процесс коррозионного деформирования). Задачей моделирования является определение долговечности конструкции, то есть времени её безотказной работы. Размерность СДУ, которая моделирует процесс коррозионного деформирования, определяется конечно-элементной моделью исследуемого объекта. Правые части дифференциальных уравнений содержат функции механических напряжений. Для вычисления напряжений используется метод конечных элементов. Предлагаемый декомпозиционный метод основан на преобразовании исходных дифференциальных уравнений системы путём введения в них функций, описывающих влияние остальных уравнений, и последующем решении одного из этих уравнений. На основании анализа факторов, влияющих на изменение напряжения в области данного конечного элемента, предложено ввести в соответствующее дифференциальное уравнение функцию, аппроксимирующую изменение внутренних усилий во времени. В этом случае расхождение результатов решения исходной СДУ и отдельного уравнения будут определяться лишь погрешностью аппроксимации зависимости внутреннего усилия от времени. В работе показано, что это позволит многократно снизить вычислительные затраты. Кроме того, в настоящей статье для численного решения СДУ предлагается использовать модифицированный алгоритм метода Эйлера с переменным шагом интегрирования по аргументу. Результатом решения является определение долговечности корродирующих конструкций, то есть времени работы до момента исчерпания несущей способности. Для иллюстрации предлагаемого метода решена задача расчёта долговечности плосконапряжённой пластины, подверженной коррозионному износу. Приводятся результаты численных экспериментов, подтверждающие точность предлагаемого численного решения при минимальных вычислительных затратах. Предложенный в статье декомпозиционный метод решения СДУ, моделирующих процесс коррозионного деформирования плосконапряжённых пластин, может быть обобщён на другие классы конструкций.

Ключевые слова: декомпозиционный метод, агрессивная среда, процесс коррозионного деформирования, система дифференциальных уравнений, плосконапряжённые корродирующие пластины.

ДЕКОМПОЗИЦІЙНИЙ МЕТОД РОЗВ'ЯЗАННЯ СИСТЕМ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ РІВНЯНЬ В ЗАДАЧАХ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ КОРОЗІЙНОГО ДЕФОРМУВАННЯ

Зеленцов Д.Г., Ляшенко О.А.

The article offers and justifies a method for solving systems of differential equations (SDE) that simulate time changes of stress and strain state due to the influence of corrosive environment (the process of corrosion deformation). The objective of modelling is the determination of the construction durability that is the time of its flawless operation. The finite element model of the object under study determines dimension of SDE modelling the process of corrosion deformation. The right-hand sides of the differential equations contain functions of mechanical stresses. The finite element method is used to calculate stresses. The proposed decomposition method is based on the transformation of the initial differential equations by introducing functions describing the influence of the remaining equations and the subsequent solution of one of these equations. Based on the analysis of the factors influencing the stress change in the area of the given finite element, we propose to introduce into the corresponding differential equation a function approximating the change of internal forces over time. In this case, the discrepancy between the results of the initial SDE solution and an individual equation is determined only by the error in approximating the dependence of the internal force on time. The article shows that this allows a multi-rate reduction of computational costs. In addition, for a numerical solution of SDE, we propose to use a modified algorithm of the Euler method with a variable integration step by argument. The result of the solution is determination of corrosive construction durability, i.e. operating time before exhaustion of bearing capacity. To illustrate the proposed method, we solved the problem of calculating the durability of a flat-plate subjected to corrosive wear. The article provides the results of numerical experiments confirming the accuracy of the proposed numerical solution with minimal computational costs. The decomposition method for solving SDE, modelling the process of corrosion deformation of plane-stressed plates, can be generalized to other classes of constructions.

Keywords: decomposition method, corrosive medium, process of corrosion deformation, system of differential equations, plane-stress corroding plates.

DECOMPOSITION METHOD FOR SOLVING SYSTEMS OF DIFFERENTIAL EQUATIONS FOR THE PROBLEMS OF MODELLING CORROSION DEFORMATION PROCESSES

Zelentsov D.G., Liashenko O.A.

Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

The article offers and justifies a method for solving systems of differential equations (SDE) that simulate time changes of stress and strain state due to the influence of corrosive environment (the process of corrosion deformation). The task of modelling is the determination of the construction durability that is the time of its flawless operation. The finite element model of the object under study determines dimension of SDE modelling the process of corrosion deformation. The right-hand sides of the differential equations contain functions of mechanical stresses. The finite element method is used for calculating stresses. The proposed decomposition method is based on the transformation of the initial differential equations by introducing in them functions describing the influence of the remaining equations and the subsequent solution of one of these equations. Based on the analysis of the factors influencing the stress change in the area of the given finite element, we propose to introduce into the corresponding differential equation a function approximating the change of internal forces over time. In this case, the discrepancy between the results of

the initial SDE solution and an individual equation is determined only by the error in approximating the dependence of the internal force on time. The article shows that this allows a multi-rate reduction of computational costs. In addition, for a numerical solution of SDE, we propose to use a modified algorithm of the Euler method with a variable integration step by argument. The result of the solution is determination of corrosive construction durability, i.e. operating time before exhaustion of bearing capacity. To illustrate the proposed method, we solved the problem of calculating the durability of a flat-plate subjected to corrosive wear. The article provides the results of numerical experiments confirming the accuracy of the proposed numerical solution with minimal computational costs. The decomposition method for solving SDE modelling the process of corrosion deformation of plane-stressed plates can be generalized to other classes of constructions.

Keywords: decomposition method, corrosive environment, process of corrosion deformation, system of differential equations, plane-stress corroding plates.

REFERENCES

1. Petrov V.V., Ovchinnikov I.G., Shikhov Yu.M. Raschet elementov konstruktsiy, vzaimodeystviyushchikh s agressivnoy sredoy [Calculation of structural elements interacting with aggressive environment]. Saratov, Sarat. un-t Publ., 1987. 288 p. (in Russian).
2. Karpunin V.G., KleschYov S.I., Kornishin M.S. K raschetu plastin i obolochek s uchetom obshchey korrozii [The calculation of plates and shells taking general corrosion into account]. Trudy X Vsesoyuznoy konferentsii po teorii obolochek i plastin, Tbilisi: Metsniereba publ., 1975, vol. 1, pp.166-174. (in Russian).
3. Zelentsov D.G., Liashenko O.A., Naumenko N.Yu. Informatsionnoe obespechenie raschetov korrodiruyushchikh ob'ektov. Matematicheskie modeli i kontseptsiya proektirovaniya system [Information provision 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).
4. Korotchenko A.T. O primenenii metoda dinamicheskogo programmirovaniya k optimal'nomu integrirovaniyu sistem differentsial'nykh uravneniy [On the application of dynamic programming to the optimal integration of differential equations system]. Prikladnye problemy prochnosti i plastichnosti. Vsesoyuzn. mezhvuz. sb., Gorkiy: GGU publ., 1976, no. 4., pp. 95-97. (in Russian).
5. Korotkaya L.I. Ispolzovanie neyronnykh setey pri chislennom reshenii nekotorykh sistem differentsialnykh uravneniy [The use of neural networks in the numerical solution of some systems of differential equations]. Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy, 2011, no. 3/4 (51). pp.24-27. (in Russian).
6. Denisuk O.R. Opredelenie ratsionalnykh parametrov chislenogo resheniya sistem differentsialnykh uravneniy [Determination of rational numerical solution parameters for some classes of systems of differential equations]. Vestnik Hersonskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta, 2016, no. 3 (58). pp.208-212. (in Russian).
7. Alapati M. Discrete Optimization of Truss Structure Using Genetic Algorithm. International Journal of Recent Development in Engineering and Technology, 2014, vol. 3, issue 1, pp.105-111.
8. Ashlock D. Evolutionary Computation for Modeling and Optimization. New York: Springer publ., 2006. 572 p.

УДК 004.8:004.94

Іванова Є.О., Коротка Л.І.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ПІДСИСТЕМА ДІАГНОСТУВАННЯ ЗАХВОРЮВАНЬ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ КРОВІ

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

Робота присвячена створенню інтелектуальної підсистеми діагностування захворювань за аналізом крові, параметри якого можуть відхилятися від норми та описуватися інтервальними величинами. У даній роботі пропонується використовувати елементи обчислювального інтелекту, зокрема: теорію нечітких множин. Для визначення відхилень аналізу крові застосовано нормативні медичні документи, на основі яких встановлюється норма або не норма показників. Пропонується описувати ті параметри, які виходять за межі нормативних документів за допомогою функцій належності. У деяких випадках використовуються лінгвістичні змінні, зокрема, терм-множини «дуже», «не дуже» та ін. Запропоновано для визначеності застосовувати прямі експертні методи побудови функцій належності. У більшості випадків обрано та використовуються трапецієвидні функції. Згідно прямих експертних оцінок, вони мають інтервальні границі змінення показників, що відхиляються від нормативних медичних документів. Для аналітичного завдання функцій належності використовується сховище їх параметрів та інтервали, на яких можуть варіюватися показники, що відхиляються від норми. Дана інформаційна підсистема має базу даних пацієнтів та динамічно оновлюється. Інформаційна підсистема розрахована на медичних працівників та має розгалужені права доступу. Так, наприклад, медичні сестри працюють тільки з базою даних, а лікарі мають доступ до всієї системи. Створена інформаційна підсистема є веб-орієнтовною, тому реалізована можливість зворотного зв'язку з пацієнтами. За їх бажанням на електронну скриньку надсилаються результати аналізу крові пацієнта. Причому, при відхиленнях у результатах за конкретними параметрами видається ступінь впевненості фахівця в тому чи іншому захворюванні. У роботі на основі нормативних медичних документів використано та сформовано нечітку базу правил медичного діагностування захворювань за аналізом крові. Створену інформаційну підсистему можна вважати інтелектуальною, так як застосовано елементи обчислювального інтелекту, до яких, зокрема, і відноситься теорія нечітких множин.

Ключові слова: функції належності, нечіткі множини, ступінь впевненості, медичне діагностування, інтелектуальна підсистема.

Постановка проблеми

Використання інформаційних технологій в медицині, як правило, ведеться за наступними напрямками: документообіг та фінансова звітність, використання відповідного обладнання, діагностування та ін.

Найбільш наукоємним напрямом є діагностування та прогнозування різного роду захворювань, яке базується на різних методах, у тому числі: статистичні методи обробки даних, нелінійних регресійних методах, використання систем штучного інтелекту [1].

На сьогоднішній день існуючий процес діагностування пацієнтів лікарень, зокрема державних, є досить довгим та багатоетапним, оскільки для підтвердження або спростування діагнозу потрібно здати низку аналізів, що може призвести, через довготривалість даного процесу, до загострення хвороби або поставлення хибного діагнозу. Існуючі автоматизовані методи діагностики є недостатньо ефективними — більшість систем орієнтована на визначення конкретного захворювання, що через специфіку медичної галузі, має високу ймовірність виявитись хиб-

ним, дані системи мають невинуватдану складність алгоритмів та їх програмної реалізації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Таким чином, існує проблема недосконалості сучасних методів діагностування, що не забезпечують високу точність виявлення захворювання та зручність застосування із залученням персональних мобільних засобів, не можуть бути використані пацієнтами дистанційно без відвідування лікарні.

Для усунення даної проблеми пропонується підхід, заснований на визначенні показників загального аналізу крові, що проводиться при більшості захворювань і профілактичних обстеженнях, та включає в себе 10 показників, кожен з яких при відхиленні від норми передбачає схильність до певних хвороб. Діагностування за допомогою отриманих показників аналізу крові допомагає виявити відхилення результатів від норми та спрогнозувати тип захворювання пацієнта з конкретним ступенем впевненості спеціаліста.

Слід зазначити, що при аналізі об'єктів, що характеризуються достатньо великою кількістю параметрів, виникає необхідність розробки та використання методів, які спеціалізуються на класифікації багатомірних даних [2].

Як зазначалося раніше, для діагностування та прогнозування захворювань можна використовувати: статистичні методи, регресійний аналіз, методи та системи штучного інтелекту, зокрема експертні системи [3], нейронні мережі [4] та нечіткі множини.

Формулювання мети дослідження

Для попередньої діагностики захворювань на основі аналізу крові базовим документом являється медично-нормативний документ [5] аналізу крові (табл. 1), виходячи з якого обирається вид функцій належності (ФН) — трапецієвидні. Тобто ядром функції належності є інтервал з медично-нормативного документу, а бічні ребра трапеції будуються на основі знань експерта у даній предметній області. Базуючись на медично-нормативному документі, маємо задачу класифікації.

Таким чином, вказаний нормативно-медичний документ дає можливість визначити інтервал, який є нормою/ненормою, як для жінок так і для чоловіків. Слід зазначити, що для завдання функцій належності, де параметри мають відхилення (тобто не норму), використовуються прямі методи побудови ФН, виходячи з експертних оцінок.

Таблиця 1

Нормативно-медичний документ аналізу крові

Показник загального аналізу крові	Нормальне значення		Одиниці виміру
	Жінки	Чоловіки	
Гемоглобін	120–140	130–160	г/л
Еритроцити	3,7–4,7	4,0–5,1	10^{12} клітин/л
Лейкоцити	4,0–9,0		10^9 клітин/л
Базофіли	0–0,65		10^9 клітин/л
Еозинофіли	4,0–8,8		10^9 клітин/л
Паличкоядерні	0,04–0,30		10^9 клітин/л
Сегментоядерні	2,0–5,5		10^9 клітин/л
Лімфоцити	1,2–3,0		10^9 клітин/л
Моноцити	0,09–0,60		10^9 клітин/л
ШОЄ	2–15	1–10	мм/год

Виклад основного матеріалу дослідження

Далі буде наведено параметри аналізу крові, які в роботі використано для надання ФН для жінок (табл. 2) та чоловіків (табл. 3). Як зазначалося раніше, на основі нормативних документів створювана інформаційна підсистема дозволяє будувати графіки функцій належності, фрагменти надання їх у програмі наводяться в таблицях. В роботі застосовуються лінгвістичні змінні, такі як відхилення від норми. Записуються терм-множини із застосуванням операцій розтягнення та стиснення, зокрема для завдання значень термів «дуже», «не дуже» та ін.

Фактично для завдання функцій належності для чоловіків та жінок головним є нормативний медичний документ, а для утворення термів при відхиленні аналізу крові використовуються синтаксичні та семантичні правила. Взагалі вони як для жінок, так і для чоловіків мають однакову структуру, тому що синтаксичні правила, які породжують назви термів, практично не відрізняються. Як відомо, семантичні правила породжуються синтаксичними.

Наприклад, для чоловіків функцію належності «гемоглобін» можна задати (виходячи з нормативного медичного документу) [2]. Аналітичне та графічне надання має вигляд, представлений в табл. 3.

Наступні показники норми/ненорми («лейкоцити», «базофіли», «еозинофіли», «паличкоядерні», «сегментоядерні», «лімфоцити» та «моноцити») однакові як для чоловіків так і для жінок, функції належності та їх графіки побудови представляються аналогічно графікам, які наведено у табл. 2 та 3. Слід зауважити, що терм-множини представляються подібним чином і тому далі не наводяться.

Таблиця 2

Надання параметрів аналізу крові для жінок за допомогою ФН

№	Назва параметра	Програмна реалізація деяких графіків ФН	Аналітичне надання ФН
1	гемоглобін		$\mu_1 = \begin{cases} 1, & \text{якщо } 10 < x < 100 \\ -0,067x + 7,67, & \text{якщо } 100 < x < 115 \\ 0,05x - 5, & \text{якщо } 100 < x < 120 \\ 1, & \text{якщо } 120 < x < 140 \\ -0,05x + 8, & \text{якщо } 140 < x < 160 \\ 0,067x - 9,67, & \text{якщо } 145 < x < 160 \\ 1, & \text{якщо } 160 < x < 220 \end{cases}$
2	еритроцити		$\mu_2 = \begin{cases} 1, & \text{якщо } 1 < x < 1,7 \\ -x + 2,7, & \text{якщо } 1,7 < x < 2,7 \\ 0,43x - 0,57, & \text{якщо } 1,35 < x < 3,7 \\ 1, & \text{якщо } 3,7 < x < 140 \\ -0,5x + 3,35, & \text{якщо } 4,7 < x < 6,7 \\ x - 5,7, & \text{якщо } 5,7 < x < 6,7 \\ 1, & \text{якщо } 6,7 < x < 8,7 \end{cases}$
3	швидкість осідання еритроцитів (ШОЕ)		$\mu_3 = \begin{cases} x - 1, & \text{якщо } 1 < x < 2 \\ 1, & \text{якщо } 2 < x < 15 \\ -0,5x + 8,5, & \text{якщо } 15 < x < 17 \\ x - 16, & \text{якщо } 16 < x < 17 \\ -0,05x + 8, & \text{якщо } 140 < x < 160 \\ 1, & \text{якщо } 17 < x < 23 \end{cases}$

Таблиця 3

Надання параметрів аналізу крові для чоловіків за допомогою ФН

№	Назва параметра	Програмна реалізація деяких графіків ФН	Аналітичне надання ФН
1	гемоглобін		$\mu_1 = \begin{cases} 1, & \text{якщо } 10 < x < 100 \\ -0,067x + 8,33, & \text{якщо } 110 < x < 125 \\ 0,05x - 5,5, & \text{якщо } 110 < x < 130 \\ 1, & \text{якщо } 130 < x < 160 \\ -0,05x + 9, & \text{якщо } 160 < x < 180 \\ 0,067x - 11, & \text{якщо } 165 < x < 180 \\ 1, & \text{якщо } 180 < x < 220 \end{cases}$
2	еритроцити		$\mu_2 = \begin{cases} 1, & \text{якщо } 1 < x < 2 \\ -0,67x + 2,33, & \text{якщо } 2 < x < 3,5 \\ 0,8x - 2,2, & \text{якщо } 2,75 < x < 4 \\ 1, & \text{якщо } 4 < x < 5,1 \\ -0,5x + 3,35, & \text{якщо } 5,1 < x < 7,1 \\ x - 6,1, & \text{якщо } 6,1 < x < 7,1 \\ 1, & \text{якщо } 7,1 < x < 9,1 \end{cases}$
3	швидкість осідання еритроцитів (ШОЕ)		$\mu_3 = \begin{cases} 2,86x - 1,86, & \text{якщо } 0,65 < x < 1 \\ 1, & \text{якщо } 1 < x < 10 \\ -0,2x + 3, & \text{якщо } 10 < x < 15 \\ 0,25x - 3,25, & \text{якщо } 13 < x < 17 \\ 1, & \text{якщо } 17 < x < 23 \end{cases}$

Як зазначалося раніше, в роботі використано медичні документи для прогнозування захворювання по аналізу крові. На їх базі формуються нечіткі правила, тобто створюється нечітка база правил. Використання такої бази дозволяє прогнозувати захворювання по аналізу крові.

Результатом роботи є спроектована інформаційна підсистема, яка розрахована на використання медиком-лаборантом та лікарем. У створеній інформаційній системі є можливість зберігання особистої інформації про пацієнтів та результатів їх аналізу крові. Система має розгалужені права доступу, тобто для середнього та вищого медичного персоналу. Лаборант безпосередньо працює з базою пацієнтів, а саме виконує: заповнення, внесення даних та результатів аналізу. Лікар має можливість аналізувати отримані результати. Роботу з базою даних пацієнтів представлено на рис. 1.

Сформувавати звіт можливо тільки при на-

явності результатів пацієнта. Доступ до процесу перегляду діагностування, що пропонує система, має тільки фахівець — лікар. Деякі звіти формуються тільки з порядковим номером бази даних пацієнтів. Останнє є необхідним для збереження конфіденційної інформації.

Наповненість бази даних, з якою працює медик-лаборант демонструє рис. 2. Очевидно, що за необхідності доступ до неї має і лікар.

Окремі фрагменти роботи програмного модуля, який на основі аналізу крові може виконати прогнозування захворювання пацієнта, надано на рис. 3. Зауважимо, що у даному випадку представлено частина вікна роботи підсистеми. Якщо відхилень від норми у пацієнта немає, то система видає значення функції належності рівним одиниці. У тих випадках, коли відхилення мають місце, то система надає степінь впевненості експерта, у якості значення від нуля до одиниці. Саме тут (у випадку відхилення) може спрацювати нечітка база правил та мож-

Параметр	Значення
ИД пациента	68
Гемоглобин (HGB)	130
Эритроциты (RBC)	5
Лейкоциты (WBS)	4,5
Базофилы (BAS)	0,7
Эозинофилы (EOS)	9
Палочкоядерные (BANDS)	0,2
Сегментоядерные (NEU)	3,5
Лимфоциты (LYM)	2,2
Моноциты (MON)	0,5
СОЭ (ESR)	10
Дата прохождения анализа	05.06.15

Рис. 1. Вікно підсистеми «Занесение результатов анализа пациента»

База данных результатов анализа пациентов

Поиск пациента

ID пациента:

☐ Женщины ☐ Мужчины

⏪ ⏴ ⏵ ⏩ ⏮ ⏭ ⏯ ⏪

ID пациента	Гемоглобин	Эритроциты	Лейкоциты	Базофилы	Эозинофилы	Палочкоядерные	Сегментоядерные	Лимфоциты	Моноциты	СОЭ	Дата прохождения анализа
54	155	4,8	6,2	0,47	9,1	0,27	3,3	2,3	0,3	8	01.04.2016
55	138	3,5	4,1	0,4	8	0,157	5,4	1,6	0,3	15	05.04.2016
56	165	4,4	6,9	0,47	9,7	0,23	3,8	2,9	0,5	13	05.04.2016
57	128	5,5	4,7	0,41	8	0,26	5,5	1,8	0,08	12	15.04.2016
58	135	4,9	6,9	0,57	8,7	0,23	3,5	1,9	0,2	10	15.04.2016
59	118	4,5	4,1	0,1	9	0,157	5,4	1,6	0,3	15	21.04.2016
60	155	4,4	6,9	0,47	5,7	0,23	3,8	2,9	0,5	8	21.04.2016
61	138	3,5	4,7	0,41	6	0,16	3,5	1,8	0,08	6	22.04.2016
62	155	4,9	6,9	0,57	7,7	0,15	3,5	1,9	0,5	4	25.04.2016
63	138	3,8	4,1	0,4	9,1	0,167	5,2	1,6	0,3	11	27.04.2016
64	130	4,4	6,9	0,47	6,7	0,055	3,8	2,9	0,5	6	08.05.2016
65	110	4,5	6,7	0,25	8	0,26	3,5	2,8	0,08	12	08.05.2016
66	145	4,9	6,6	0,47	8,7	0,1	0	3,2	1,9	3	08.05.2016
67	106	7	10	1,2	8,9	0,9	6,1	3,2	0,7	18	08.05.2016
68	130	5	4,5	0,7	9	0,2	3,5	2,2	0,5	10	05.06.2015

Рис. 2. Вікно підсистеми «База данных результатов анализа пациентов»

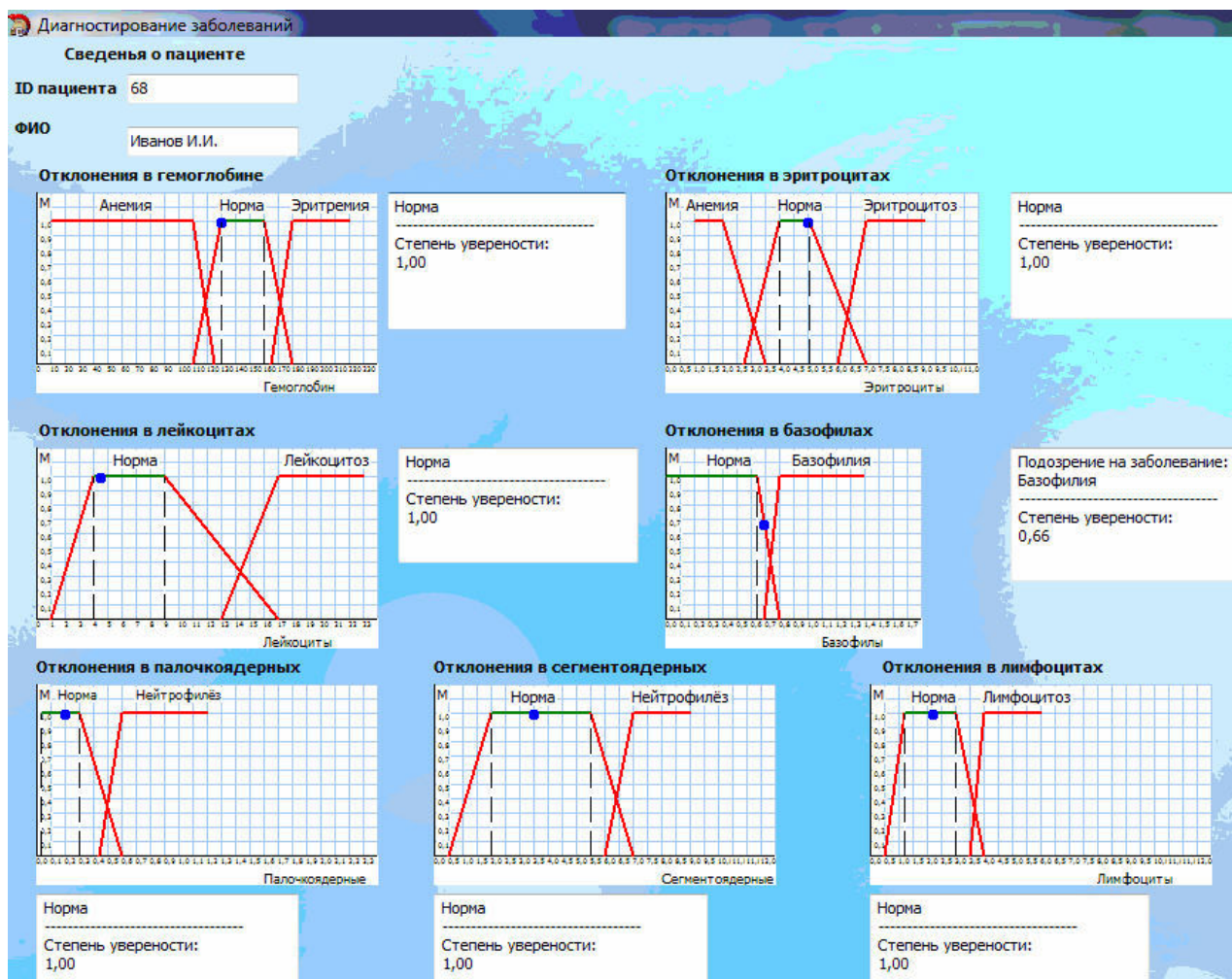


Рис. 3. Фрагмент вікна підсистеми «Диагностирование заболеваний»

Результат проведения анализа: общий анализ крови			
ID пациента: 68		ФИО пациента: Иванов И.И.	Пол: М
Показатель	Результат	Единицы измерения	Отклонение от нормы
Гемоглобин	130	г/л	Норма
Эритроциты	5	10^{12} клеток/л	Норма
Лейкоциты	4,5	10^9 клеток/л	Норма
Базофилы	0,7	10^9 клеток/л	Выше нормы
Эозинофилы	9	10^9 клеток/л	Выше нормы
Палочкоядерные	0,2	10^9 клеток/л	Норма
Сегментоядерные	3,5	10^9 клеток/л	Норма
Лимфоциты	2,2	10^9 клеток/л	Норма
Моноциты	0,5	10^9 клеток/л	Норма
СОЭ	0,5	мм/час	Норма

Примечание	
Возможные заболевания:	Степень уверенности эксперта:
Базофилия	0,66
Эозинофилия	0,90

Рис. 4. Вікно сформованого звіту зі ступенем впевненості експерта

ливо отримати прогнозоване захворювання, у тому числі, наприклад, з використанням лінгвістичних змінних.

Наступні фрагменти роботи програмного модуля демонструють відхилення від норми деяких показників аналізу крові та надають ступінь впевненості експерта про те, що те чи інше захворювання може бути у пацієнта. Лікар, який має доступ до інформаційної системи, може аналізувати отримані результати та приймати рішення відносно отриманих результатів. У тому випадку, коли результати аналізу мають відхилення, то автоматично формується звіт, який за згодою пацієнта надсилається йому електронною поштою.

Саме такі результати роботи інформаційної підсистеми діагностування наведено на рис. 4. Зауважимо, що у даному фрагменті мають місце відхилення у результаті аналізу крові, а саме прогнозується захворюваність базофілією та еозінофілією зі ступенем впевненості експерта відповідно 0,66 та 0,90.

Висновки

Формалізовано нечітку інформацію за до-

помогою теорії нечітких множин, а саме: показники аналізу крові записано за допомогою трапецієвидних функцій належності, ядром яких є дані медично-нормативного документа. Реалізовано можливість прогнозування захворювання пацієнта за аналізом крові, а саме: якщо вони виходять за норму, то за допомогою значень функції належності визначати ступінь впевненості експерта.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. — М.: Физматлит, 2001. — 221 с.
2. Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: пер. с польск. И.Д. Рудинского. — М.: Телеком, 2007. — 452 с.
3. Thomas S. V., Kurup J. R., Kuruvilla A. An expert system for the diagnosis of epilepsy: results of a clinical trial // Natl Med J India. — 2001. — №14 (5).— p.274-276.
4. Иванова Е.А., Короткая Л.И. Подсистема диагностирования заболеваний на основании анализа крови с при-

менением сетей Кохонена // Проблемы математического моделирования: материалы Всеукр. науч.-метод. конф., 25-27 трав. 2016 р. – Дніпродзержинськ: Біла К., 2016. – С.7-9.

5. Кишкун А.А. Руководство по лабораторным методам диагностики – М.: Медиа, 2007 – 800 с.

Надійшла до редакції 12.10.2017

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПОДСИСТЕМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЗАБОЛЕВАНИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА КРОВИ

Иванова Е.А., Короткая Л.И.

Для определения отклонений анализа крови используют нормативные медицинские документы, на основании которых определяется норма или не норма показателей. Предлагаются описывать те параметры, которые выходят за пределы нормативных медицинских документов с помощью функций принадлежности. В некоторых случаях используются лингвистические переменные, в частности, терм-множества «сильно», «не сильно» и др. Предложено для определенности использовать прямые экспертные методы построения функций принадлежности. В большинстве случаев выбрано и используются трапецевидные функции. Согласно прямым экспертным оценкам, они имеют интервальные границы изменения показателей, которые отклоняются от нормативных медицинских документов. Для аналитического задания функций принадлежности используется хранилище их параметров и интервалов, на которых могут варьироваться показатели, которые отклоняются от нормы. Данная информационная подсистема имеет базу данных пациентов и динамически обновляется. Информационная подсистема рассчитана на медицинских работников и имеет разветвленные права доступа. Так, например, медицинские сестры работают только с базой данных, а врачи имеют доступ ко всей системе. Созданная информационная подсистема является веб-ориентированной, поэтому реализована возможность обратной связи с пациентами. По их желанию, на электронную почту отправляются результаты анализа крови пациента. Причём, при отклонениях в результатах по конкретным параметрам выдаётся степень уверенности специалиста в том или ином заболевании. В работе на основе нормативных медицинских документов использовано и сформировано нечёткую базу правил медицинского диагностирования заболеваний по анализу крови. Созданную информационную подсистему можно считать интеллектуальной, так как использованы элементы вычислительного интеллекта, к которым, в частности, и относится теория нечётких множеств.

Ключевые слова: функции принадлежности, нечёткие множества, степень уверенности, медицинское диагностирование, интеллектуальная подсистема.

INTELLECTUAL SUBSYSTEM THAT IS USED TO DIAGNOSE DISEASES BY ANALYZING BLOOD

Ivanova E.A., Korotka L.I.

Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

The work is devoted to the creation of an intellectual subsystem for diagnosing diseases by analyzing blood, the parameters of which may deviate from the norm and be described by interval values. In this paper, proposes to use elements of computational intelligence, in particular: the theory of fuzzy sets. To determine the deviations of the blood test, the normative medical documents are used, on the basis of which the norm or not the norm of the indicators is determined. It is proposed to describe those parameters that go beyond the limits of normative medical documents with the use of membership functions. In some cases, linguistic variables are used, in particular, the term sets are «very», «not very» and other. It is suggested to use direct expert methods of constructing membership functions for definiteness. In most cases, trapezoidal functions are selected and used. According to direct expert assessments, they have interval boundaries for changing indicators, which deviate from normative medical documents. For the analytical assignment of membership functions, the storage of their parameters and intervals is used, on which indicators that deviate from the norm can vary. This information subsystem has a patient database and is dynamically updated. The information subsystem is designed for medical workers and has ramified access rights. For example, nurses work only with a database, and doctors have access to the entire system. The created information subsystem is web-oriented, therefore the opportunity of a feedback with patients is realized. For their desire, the results of a patient's blood test are sent to the e-mail. Moreover, with deviations in the results of a blood test, the degree of confidence of a specialist in a particular disease is given. In the work on the basis of normative medical documents, a fuzzy base for the rules of medical diagnosis of diseases for blood analysis was used and formed. The created information subsystem can be considered intellectual, since elements of computational intelligence are used, to which, in particular, the theory of fuzzy sets belongs. The created information subsystem can be considered intellectual, since elements of computational intelligence are used, to which, in particular, the theory of fuzzy sets belongs.

Keywords: membership function, fuzzy sets, degree of assurance, medical diagnostics, intelligent subsystem.

REFERENCES

1. Kruglov V.V., Dli M.I., Golunov R.Ju. Nechetkaya logika i iskusstvennyie neyronnyie seti [Fuzzy logic and artificial neural network]. Fizmatlit, Moscow, 2001. 221 p. (in Russian).
2. Rutkovskaja D., Pilinskij M., Rutkovskij L. Neyronnyie seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy: per. s polsk. I.D. Rudinskogo [Neural Networks, genetic algorithms and fuzzy systems]. Telekom, Moscow, 2007. 452 p. (in Russian).
3. Thomas S.V., Kurup J.R., Kuruvilla A. An expert system for the diagnosis of epilepsy: results of a clinical trial. Natl Med J India, 2001, vol. 14, no. 5, pp. 274-276.
4. Ivanova E.A., Korotkaja L.I. Podsystema diagnostirovaniya zabolovanij na osnovanii analiza krovi s primeneniem setej Kohonena. *International scientific and methodological conference «Mathematical Modelling Problems»*. Ukraine, Dniprodzerzhynsk, 2016. pp. 7-9. (in Russian).
5. Kishkun A.A. Rukovodstvo po laboratornym metodam diagnostiki [Guide to laboratory diagnostic methods]. Media, Moscow, 2007. 800 p. (in Russian).

Косолап А.И.

ЧИСЛЕННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДА ТОЧНОЙ КВАДРАТИЧНОЙ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ

ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепр, Украина

В данной работе рассматриваются методы решения многоэкстремальных задач в конечномерном евклидовом пространстве. Такие задачи возникают при математическом моделировании сложных систем в экономике, финансах, управлении, технологических процессах, информатике, проектировании и других областях. Показано, что к этому классу задач преобразуются дискретные задачи, а также задачи решения нелинейных уравнений. В последние годы приложены значительные усилия исследователей для разработки методов решения многоэкстремальных задач. Разработаны методы ветвей и границ, полуопределенное программирование, двойственные методы, генетические и эволюционные методы и многие другие. В настоящее время для проверки эффективности методов используются разработанные сложные тестовые задачи, а также задачи из различных прикладных областей. Многочисленные эксперименты показывают, что только для некоторых тестовых задач существующие методы позволяют находить оптимальные решения. Во многих случаях эти решения далеки от оптимальных. Будем использовать точную квадратичную регуляризацию для преобразования многоэкстремальных задач к максимизации нормы вектора на выпуклом множестве. Такое преобразование часто сводит исходную многоэкстремальную задачу к одноэкстремальной. Для поиска локального экстремума используем прямо-двойственный метод внутренней точки и метод дихотомии для решения преобразованной задачи. Эти методы позволяют решать многоэкстремальные задачи большой размерности. Проведены значительные численные эксперименты на тестовых задачах для проверки эффективности методов. Практически для всех тестовых задач с неизвестными решениями методом точной квадратичной регуляризации были получены лучшие результаты. Эти результаты легко проверить, подставив найденное оптимальное решение в ограничения и целевую функцию соответствующей тестовой задачи. Проведенные эксперименты показывают значительное преимущество метода точной квадратичной регуляризации над существующими методами решения многоэкстремальных задач.

Ключевые слова: многоэкстремальные задачи, тестовые задачи, глобальная оптимизация, метод точной квадратичной регуляризации.

Постановка проблемы и анализ последних исследований и публикаций

Одними из наиболее сложных проблем в численном анализе является решение задач глобальной оптимизации. Несмотря на значительные усилия исследователей в этой области, пока эффективные методы решения таких задач не предложены. Разработаны методы ветвей и границ [1], время решения которыми растет экспоненциально при увеличении размерности задачи. Другие методы для решения задач глобаль-

ной оптимизации используют случайный поиск (генетические, эволюционные алгоритмы) [2]. Однако в многомерном пространстве случайный поиск неэффективен, что подтверждается численными экспериментами. Кроме того, такие методы содержат множество настраиваемых параметров, поэтому решение одних и тех же задач этими методами дают различные результаты. Новым направлением в глобальной оптимизации является полуопределенная релаксация для решения квадратичных и полиномиальных

задач [3]. В общем случае, такая релаксация позволяет находить только оценки оптимальных решений. Часто найденное решение находится вблизи глобального экстремума, который можно найти локальным методом. Разрабатываются также двойственные методы для решения задач глобальной оптимизации. Разрыв двойственности в многоэкстремальных задачах между значениями целевых функций прямой и двойственной задачи также позволяет, в общем случае, находить только оценки решений. Все эти методы прошли многократную численную проверку при решении тестовых и практических задач. Полученные результаты вынуждают искать новые эффективные методы для решения многоэкстремальных задач. Для оценки эффективности метода используют три подхода: доказательство сходимости метода и определение скорости его сходимости, определение оценки числа итераций для получения ϵ -оптимального решения и проведение численных экспериментов на многочисленных сложных тестовых задачах. Первые два подхода должны учитывать самые неблагоприятные условия задачи, которые могут не представлять практического интереса. Такая ситуация наблюдается при использовании симплекс-метода в линейном программировании. Этот метод теоретически неэффективен, но практически эффективен, что доказано решением сотни тысяч практических задач. Доказательства сходимости методов часто содержат условия, которые сложно проверить при их практической реализации. При оценке числа итераций необходимо учитывать, что сложность этих итераций в различных методах существенно различна. Поэтому в последние годы эффективность методов проверяется при решении множества сложных тестовых задач. Некоторые из этих задач имеют 2^n или $n!$ локальных экстремумов.

Постановка задачи и ее решение

В этой работе рассматривается метод точной квадратичной регуляризации [4] для решения многоэкстремальных задач. В этом методе исходная многоэкстремальная задача:

$$\min \{f_0(x) \mid f_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, m, x \in E^n\}, \quad (1)$$

где все $f_i(x)$ — дважды дифференцируемые функции, а E^n — евклидово пространство преобразуется к задаче максимума нормы вектора на выпуклом множестве. Задача (1) содержит все квадратичные и полиномиальные задачи. В задаче (1) переменные могут принимать непре-

рывные, дискретные или булевы значения. Если переменные только целочисленные, то они удовлетворяют условию:

$$\sum_{i=1}^n (1 - \cos(2\pi x_i)) \leq 0.$$

Булевы переменные удовлетворяют ограничениям:

$$\sum_{i=1}^n x_i (1 - x_i) \leq 0, 0 \leq x_i \leq 1.$$

Иногда переменные принимают только одно из дискретного множества значений $x_i \in \{u_{i1}, \dots, u_{iq}\}$, тогда такие переменные заменяем условиями:

$$x_i = \sum_{j=1}^q z_{ij} u_{ij}, \sum_{j=1}^q z_{ij} = 1, z_{ij} = 0 \vee 1, i = 1, \dots, n.$$

Часто ограничения задачи (1) имеют вид равенств:

$$f_i(x) = 0, i = 1, \dots, m.$$

В этом случае они легко преобразуются к неравенствам:

$$f_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, m, -\sum_{i=1}^m f_i(x) \leq 0$$

или

$$\max \left\{ \sum_{i=1}^m f_i(x) \mid f_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, m \right\},$$

если решается нелинейная система уравнений.

Точная квадратичная регуляризация позволяет преобразовать задачу (1) к виду:

$$\max \{ \|x\|^2 \mid x \in S(d) \}, \quad (2)$$

где S — выпуклое множество:

$$S(d) = \{x \mid f_0(x) + s + (r-1) \|x\|^2 \leq d, f_i(x) + r \|x\|^2 \leq d, i = 1, \dots, m\},$$

здесь $\|x\|^2 = x_1^2 + \dots + x_n^2 + x_{n+1}^2$. Легко убедиться в том, что при фиксированном значении d максимальному допустимому значению $\|x\|^2$ будет соответствовать минимальное значение $f_0(x)$. При

увеличении d и максимизации $\|x\|^2$ значение $f_0(x)$ будет убывать. Необходимо определить минимальное значение d при котором с заданной точностью выполнится условие $r\|x\|^2=d$.

Преобразованная задача (2) содержит два параметра и две новых переменных. Параметр $r>0$ выбирается таким, чтобы множество $S(d)$ было выпуклым. Для квадратичных задач значение этого параметра легко найти (матрицы квадратичных слагаемых должны быть с преобладающими диагоналями). Параметр s должен удовлетворять условию:

$$s \geq \|x^*\|^2 - f_0(x^*),$$

где x^* – решение задачи (1). При таком значении s первое ограничение задачи (2) будет активным. Обычно для переменных задачи (1) можно установить двухсторонние ограничения, что позволяет определить значение параметра s .

Задача (2) в общем случае, многоэкстремальная, но может быть и одноэкстремальной, если решение (d_0, x^0) задачи выпуклой оптимизации:

$$\min \{d \mid x \in S, r\|x\|^2 \leq d\}$$

удовлетворяет условию $r\|x^0\|^2=d_0$. Задача (2) легко преобразуется к одноэкстремальной также в других случаях. Например, когда выпуклое множество S является параллелепипедом. Часто сдвиг выпуклого множества S вдоль биссектрисы положительного ортанта также преобразует задачу (2) к одноэкстремальной. Это связано с тем, что в точке максимума кривизна сферы $S_0=\{x \mid r\|x\|^2=d\}$ будет меньше кривизны выпуклой поверхности ∂S . Если задача (2) многоэкстремальная, то на минимальной дуге, соединяющей два локальных максимума, будет находиться, по крайней мере, один минимум нормы вектора. В этой точке минимума кривизна S_0 будет больше кривизны ∂S . Теперь, если множество S переместить в направлении положительного ортанта, то кривизна ∂S останется неизменной, а кривизна S_0 будет стремиться к нулю при увеличении сдвига. Это означает, что существует такой сдвиг множества $S(d)$, что задача:

$$\min \{\|x\|^2 \mid x \in \partial S(d)\}$$

не будет содержать внутренних локальных минимумов. Но тогда задача (2) будет одноэкстремальной.

Для решения задачи (2) использовался пря-

мо-двойственный метод внутренней точки [5] и метод дихотомии по переменной d . В задаче (2) необходимо найти минимальное значение d , при котором ее решение удовлетворяет условию $r\|x\|^2=d$. Это значение d находим методом дихотомии.

Результаты сравнительных численных экспериментов

Для проверки численной эффективности метода точной квадратичной регуляризации использовали известные тестовые задачи, а также многоэкстремальные модели различных прикладных задач. Этим методом решено более 300 сложных тестовых задач число локальных экстремумов в некоторых из них равно 2^n или $n!$ и больше. Много таких тестовых задач представлено на веб-сайте GLOBAL Library: <http://www.gamsworld.org/global/globallib.htm> (GL). Максимальная размерность решаемых данным методом задач равнялась 150. Но, учитывая то, что локальным поиском решаются задачи до 10 млн. переменных, данный метод можно использовать для решения многоэкстремальных задач такой же размерности.

Тестовые задачи, разработанные для проверки численной эффективности методов можно разбить на классы. Это задачи малой размерности, задачи с тривиальными решениями, задачи с известными решениями и задачи с неизвестными решениями. Для задач с неизвестными решениями существующими методами значение целевых функций постепенно улучшается по мере того, как совершенствуются методы их решения. Но метод точной квадратичной регуляризации показал лучший результат практически по всем этим тестовым задачам. Например, для известной тестовой задачи Rana:

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} \left[\begin{aligned} &(x_{i+1}+1) \cos(\sqrt{|x_{i+1}-x_i+1|}) \times \\ &\times \sin(\sqrt{|x_{i+1}+x_i+1|}) + \\ &+ x_i \cos(\sqrt{|x_{i+1}+x_i+1|}) \times \\ &\times \sin(\sqrt{|x_{i+1}-x_i+1|}) \end{aligned} \right] \mid -520 \leq x \leq 520 \right\} \quad (3)$$

для $n=20$ лучший результат, полученный другими методами, равняется $-9742,310076$, а методом точной квадратичной регуляризации получено значение целевой функции задачи (3) рав-

ное $-9819,53154$, что значительно меньше. Далее, для тестовой задачи:

$$\min \left\{ \begin{array}{l} 10x_1x_4 - 6x_2^2x_3 + x_1^3x_2 + 9\sin(x_5 - x_3) + \\ + x_2^3x_4x_5^4 \mid \sum_{i=1}^5 x_i^2 \leq 20, \\ x_1^2x_3 + x_4x_5 \geq -2, x_2^2x_4 + 10x_1x_5 \geq 5 \end{array} \right\}$$

лучшее решение целевой функции, полученное другими методами равно $-2461,115783$, а методом точной квадратичной регуляризации получено значение целевой функции равно $-5675,620079$, что также значительно меньше. Список таких задач можно продолжить. В работе [6] приведено 67 тестовых задач с полученными лучшими результатами методом точной квадратичной регуляризации. В таблице приведены некоторые из полученных результатов.

Метод точной квадратичной регуляризации использовался также для решения известных прикладных задач. Это задачи минимизации потенциальной энергии атомов. Уже для систе-

мы из 5 атомов минимальная потенциальная энергия точно неизвестна. Автором решена задача с 30 и 50 атомами. Решались сложные задачи упаковки шаров, в частности, задача нахождения контактного числа. Методом точной квадратичной регуляризации были найдены координаты центров 24 единичных шаров в 4-х мерном пространстве, касающиеся одного шара. Решались задачи наиболее плотной упаковки шаров в квадраты и шары. Очень сложными для численного решения являются задачи теории расписаний. Для этого класса задач получены первые обнадеживающие результаты. Решены несколько задач оптимизации конструкций. Получены первые результаты по оптимальному раскрою материалов. Много задач решено по оптимизации надежности сложных систем управления. В некоторых случаях данным методом получены лучшие показатели надежности, чем другими методами. Круг сложных прикладных задач, решаемых методом точной квадратичной регуляризации, постоянно расширяется. Все это говорит о том, что этот метод на сегодня является наиболее эффективным для решения многоэкстремальных задач.

Сравнительные численные эксперименты

№ п/п	Задача	n	m	Метод EQR Значение глобального минимума	Лучшее известное значение глобального минимума	Источник
1	Ex4.6	20	0	-3,3137889	-0,3827	[7]
2	Egg Holder	20	0	-17313,8055	-14371,8	[8]
3	Rana	20	0	-9819,531542	-9742,310076	[8]
4	LJ 30	90(30)	0	-135,1146	-128,286571	[9]
5	LJ 50	150(50)	0	-247,36484	-244,549926	[9]
6	DropWave	50	0	-0,936245328	0,0194	[10]
7	Ex. 4.2	10	0	-368,91465	-367,73255	[11]
8	meanvar	9	2	-28,78870202	5,2434	GL
9	ODIRS	14	15	0,0311596	0,057406	[12]
10	GTCD	4	1	2964375,495	2964377,63	[12]
11	Ex7 3 3	5	8	-5	-0,817529	GL
12	PC55	16	21	156,2196293	174,788	[13]
13	house	8	8	-4500	-2625	GL
14	GGP9	10	6	0,97888325	1,1437	[14]
15	GGP6	4	3	0,00398785	0,032615	[14]
16	Ex6 1 2	3	1	-83,27457479	-83,25349567	GL
17	chance	4	3	23,85531631	29,8943782	GL
19	Ex7 2 10	12	9	0	0,1	GL
20	Ex2 1 7	20	10	-4150,40992	-4105,2779	GL
22	Ex5.3	5	3	-5675,620079	-2461,115783	[15]
23	Ex2 1 8	24	10	15639	15990	GL
24	Ex6 1 1	8	6	-1,00905	-0,0202	GL
25	Ex7 3 5	13	15	7,68E-06	1,2065255	GL
26	Ex8 4 7	63	41	26,99430909	29,0473	GL
27	Harker	20	7	-987,7592744	-986,513	GL

Выводы

В работе приведены сравнительные численные эксперименты по проверке эффективности метода точной квадратичной регуляризации при решении множества сложных тестовых задач. Эти эксперименты показывают значительное преимущество данного метода. Полученные лучшие результаты при решении тестовых задач легко проверить. Приведенные данные решения тестовых задач могут быть использованы для улучшения существующих методов решения задач глобальной оптимизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Horst R., Tuy H. Global Optimization: Deterministic Approaches. 3rd ed. — Berlin: Springer-Verlag, 1996. — 727 p.
2. Kenneth V.P., Storn R.M., Lampinen J.A. Differential Evolution. A Practical Approach to Global Optimization. — Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. — 542 p.
3. Ye Y. Semidefinite programming. — Stanford University, 2003. — 161 p.
4. Косолап А.И. Глобальная оптимизация. Метод точной квадратичной регуляризации. — Днепропетровск: ПГА-СА, 2015. — 164 с.
5. Nocedal J., Wright S.J. Numerical optimization. — Springer, 2006. — 685 p.
6. Косолап А.И. Глобальная оптимизация. Численные эксперименты. — Днепр, ПГА-СА, 2015. — 112 с.
7. Nie J. Regularization Methods for Sum of Squares Relaxations in Large Scale Polynomial Optimization. — California: University of California, 2009. — 31 p.
8. Piotrowski A.P., Napiyrkowski J.J. The grouping differential evolution algorithm for multi-dimensional optimization problems // Control and Cybernetics. — 2010. — vol. 39. — No. 2. — P.527-550.
9. Reviews in Computational Chemistry. Volume 18. Edited by K.B. Lipkowitz, D.B. Boyd. — John Wiley & Sons, Inc. — 2002. — 238 p.
10. Neri F., Tirronen V. Recent advances in differential evolution: a survey and experimental analysis // Artif. Intell. Rev. — 2010. — vol. 33. — P.61-106.
11. Malek A., Hosseini-pour-Mahani N. Solving a class of non-convex quadratic problems based on generalized kkt conditions and neurodynamic optimization technique // Kybernetika. — 2015. — vol. 51. — Num. 5. — P.890-908.
12. Pant M., Thangaraj R., Singh V.P. Optimization of Mechanical Design Problems Using Improved Differential Evolution Algorithm // International Journal of Recent Trends in Engineering. — 2009. — vol. 1. — No. 5. — P.21-25.

13. A branch and cut algorithm for nonconvex quadratically constrained quadratic programming / C. Audet, P. Hansen, B. Jaumard, G. Savard // Math. Program. — 2000. — Ser. A 87. — P.131-152.

14. General variable neighborhood search for the continuous optimization/ N. Mladenovic, M. Drazic, V. Kovacevic-Vujcic, M. Cangalovic // European Journal of Operational Research. — 2008. — No. 191. — P.753-770.

15. A Nonlinear Optimization Program in MATLAB / By editor Yinyu Ye. — Iowa City: University of Iowa. — 1989. — 19 p.

Поступила в редакцию 17.10.2017

ЧИСЕЛЬНА ЕФЕКТИВНІСТЬ МЕТОДУ ТОЧНОЇ КВАДРАТИЧНОЇ РЕГУЛЯРИЗАЦІЇ

Косолап А.І.

У даній роботі розглядаються методи розв'язування багатоекстремальних задач в скінченномірному евклідовому просторі. Такі задачі виникають при математичному моделюванні складних систем в економіці, фінансах, управлінні, технологічних процесах, інформації, проектуванні і інших областях. Показано, що до цього класу задач перетворюються дискретні задачі, а також задачі розв'язання нелінійних рівнянь. В останні роки докладено значних зусиль дослідників для розробки методів розв'язування багатоекстремальних задач. Розроблено методи меж та границь, напіввизначене програмування, двоїсті методи, генетичні та еволюційні методи і багато інших. В даний час для перевірки ефективності методів використовуються розроблені складні тестові задачі, а також задачі з різних прикладних областей. Багатовислі експерименти показують, що тільки для деяких тестових задач існуючі методи дозволяють знаходити оптимальні розв'язки. У багатьох випадках ці розв'язки далекі від оптимальних. Будемо використовувати точну квадратичну регуляризацію для перетворення багатоекстремальних задач до максимуму норми вектора на опуклій множині. Таке перетворення часто зводить початкову багатоекстремальну задачу до однократної. Для пошуку локального екстремуму використовуємо прямо-двоїстий метод внутрішньої точки і метод дихотомії для розв'язування перетвореної задачі. Ці методи дозволяють розв'язувати багатоекстремальні задачі великої розмірності. Проведено значні чисельні експерименти на тестових задачах для перевірки ефективності методів. Практично для всіх тестових задач з невідомими розв'язками методом точної квадратичної регуляризації були отримані кращі результати. Ці результати легко перевірити, підставивши знайдений оптимальний розв'язок в обмеження і цільову функцію відповідної тестової задачі. Проведені експерименти показують значну перевагу методу точної квадратичної регуляризації над існуючими методами розв'язування багатоекстремального задач.

Ключові слова: багатоекстремальні задачі, тестові задачі, глобальна оптимізація, метод точної квадратичної регуляризації.

THE NUMERICAL EFFICIENCY OF THE METHOD OF EXACT QUADRATIC REGULARIZATION

Kosolap A.I.

Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

In this paper we consider methods for solving the multi-extreme problems in Euclidean finite-dimensional space and compare their efficiency at the solution of test problems. Such multi-extreme problems arise at mathematical modeling of various difficult systems in economics and finance, management, technological processes, computer science, design and others. We show that this class of problems contains discrete problems and also problems of solution of nonlinear equations. Recently considerable efforts have been made to find effective methods of solving multi-extreme problems. Nowadays researchers use such methods as: semidefinite programming, methods of branches and bounds, dual, genetic, evolutionary and other methods. Complex testing problems are used for the analysis of the efficiency of offered methods. Test problems of constrained and unconstrained optimization include also complex of applied problems. Numerous experiments prove that known methods find the optimal solution for a limited number of test problems. In this paper we consider the method of exact quadratic regularization. It can be used to transform multi-extreme problems into problems of searching maximum norm of a vector on a convex set. It is a very simple transformation. Such transformation often reduces the initial multi-extreme problem to the one-extreme one. For solving the transformed problem we use the primal-dual interior point method and bisection method. These methods allow solving high-dimensional multi-extreme problems. A large number of numerical experiments were performed for checking the efficiency of offered method. By implementing the method of exact quadratic regularization we have obtained better results for most test problems with unknown solutions. Comparative numerous experiments prove the substantial advantage of offered method of exact quadratic regularization over widely used optimization methods.

Keywords: multi-extreme problems, test problems, global optimization, method of exact quadratic regularization.

REFERENCES

1. Horst R., Tuy H. *Global Optimization: Deterministic Approaches*. 3rd ed., Springer-Verlag, Berlin, 1996. 727 p.
2. Kenneth V.P., Storn R.M., Lampinen J.A. *Differential Evolution. A Practical Approach to Global Optimization*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2005. 542 p.
3. Ye Y. Semidefinite programming. Stanford University, 2003. 161 p.
4. Kosolap A.I. *Globalnaya optimizatsiya. Metod tochnoy kvadrachnoy regulyarizatsyi* [Global optimization. A method of exact quadratic regularization]. Dnipropetrovsk, PGASA [PSAES], 2015. 164 p. (in Russian).
5. Nocedal J., Wright S.J. *Numerical optimization*. Springer, 2006. 685 p.
6. Kosolap A.I. *Globalnaya optimizatsiya. Chislennyye eksperimenty* [Global optimization. Numerical experiments]. Dnipro, PGASA [PSAES], 2015. 112 p. (in Russian).
7. Nie J. *Regularization Methods for Sum of Squares Relaxations in Large Scale Polynomial Optimization*. University of California, California, 2009. 31 p.
8. Piotrowski A.P., Napiorkowski J.J. The grouping differential evolution algorithm for multi-dimensional optimization problems. *Control and Cybernetics*, 2010, vol. 39, No. 2, pp. 527-550.
9. *Reviews in Computational Chemistry*. Volume 18. Edited by K.B. Lipkowitz and D.B. Boyd. John Wiley & Sons, Inc. 2002. 238 p.
10. Neri F., Tirronen V. Recent advances in differential evolution: a survey and experimental analysis. *Artif. Intell. Rev.*, 2010, vol. 33, pp. 61-106.
11. Malek A., Hosseinipour-Mahani N. Solving a class of non-convex quadratic problems based on generalized kkt conditions and neurodynamic optimization technique. *Kybernetika*, 2015, vol. 51, no. 5, pp. 890-908.
12. Pant M., Thangaraj R., Singh V.P. Optimization of Mechanical Design Problems Using Improved Differential Evolution Algorithm. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 2009, vol. 1, no. 5, pp. 21-25.
13. Audet C, Hansen P., Jaumard B., Savard G. A branch and cut algorithm for nonconvex quadratically constrained quadratic programming. *Math. Program.*, 2000, ser. A 87, pp. 131-152.
14. Mladenovic N., Drazic M., Kovacevic-Vujcic V., Cangalovic M. General variable neighborhood search for the continuous optimization. *European Journal of Operational Research*, 2008, no. 191, pp. 753-770.
15. A Nonlinear Optimization Program in MATLAB. By editor Yinyu Ye. University of Iowa, Iowa City, 1989. 19 p.

Манукян А.А., Селивёрстова Т.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ОТ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ХАРАКТЕРА ЛАНДШАФТА

Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина

В данной работе исследовано поведение потока загрязняющих веществ, в процессе их распространения из дымовой трубы. Это поможет лучше понять, каким образом происходит загрязнение воздуха. С помощью программы Solid Edge созданы три трёхмерные модели для точечного источника загрязнения с разным типом рельефа: ровный ландшафт, холмистый ландшафт и городская застройка, которая состоит из зданий различных размеров. Трёхмерные модели имеют одинаковые геометрические размеры, дымовую трубу, а разный тип рельефа помогает исследовать поведение потока в различных условиях. На основе трёхмерных моделей реализованы модельные задачи с использованием программного продукта ANSYS. Вычисления в программном продукте ANSYS проводятся с помощью метода конечных элементов. Созданы полигональные сетки для трёхмерных моделей для реализации метода конечных элементов. Показано, как меняется траектория потока примесей в зависимости от характера ландшафта. В модели с ровным рельефом траектория потока загрязняющих веществ направлена вниз. В модели с холмистым ландшафтом после столкновения с препятствием траектория потока загрязняющих веществ направлена вверх. В модели с городской застройкой после столкновения с препятствием траектория потока загрязняющих веществ так же направлена вверх. Выявлено, что городская застройка оказывает меньшее влияние, чем неровный рельеф. Прежде всего, это связано с высотой препятствия относительно высоты источника загрязнения. Изменение траектории потока влияет на уровень концентрации загрязняющих веществ. Первая и третья модели имеют схожий уровень концентрации загрязняющих веществ. Во второй модели уровень концентрации загрязняющих веществ ниже. Установлено, что уровень концентрации загрязняющих веществ значительно снижается после столкновения с холмистым ландшафтом, высота которого превышает высоту дымовой трубы.

Ключевые слова: моделирование, загрязнение атмосферы, точечный источник, примеси, ANSYS, вычислительная гидродинамика, метод конечных элементов.

Постановка проблемы

Несмотря на стремительное развитие альтернативной энергетики в последние годы, вопрос загрязнения окружающей среды до сих пор остается актуальным для Украины [1]. Электростанции, заводы, вентиляционные шахты, автомобильный транспорт на двигателях внутреннего сгорания, самолеты — все это служит источником примесей, попадающих в атмосферу. Современные вычислительные системы позволяют реализовать не только сложные математические расчеты, но и их визуальное моделирование, в том числе загрязнения окружающей среды. Наглядная демонстрация данного про-

цесса, в сочетании с полученными численными результатами предоставляет возможность подойти к решению проблемы комплексно.

Анализ последних исследований и публикаций

Существуют различные способы исследования загрязнения окружающей среды и построения как математических, так и визуальных моделей. К ним относится мониторинг, статистика, регрессионный анализ, нейронные сети, трёхмерные модели, модели выбросов, метеорологические модели, химические модели, Гауссовы модели. Модели распространения примесей в атмосфере подразделяются на два класса: рассеивание примесей в атмосфере и загряз-

Таблица 1

Параметры объекта моделирования

Размер	Ширина	Длина	Высота	Высота трубы	Диаметр основания трубы	Диаметр вентиляционного отверстия
Геометрический (мм)	20000	40000	12000	6000	1300	1100
Физический (м)	400	800	240	120	26	22

нение атмосферного воздуха. Ряд программных продуктов реализуют класс задач вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics), которые основаны на системе нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка. Такие уравнения могут решаться по методу: конечных разностей, конечных элементов, конечных объёмов, smoothed частиц [2–4].

Постановка задачи

Целью статьи является исследование траектории распространения потока примесей в атмосфере в зависимости от характера преград.

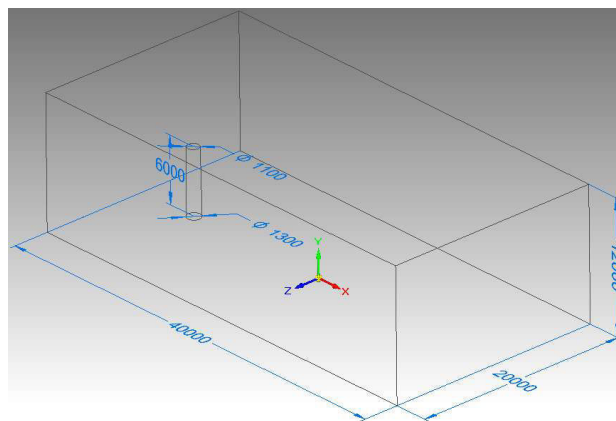
Изложение основного материала исследования

Как известно, существует множество типов источников загрязнения атмосферы. В статье рассмотрен антропогенный производственный точечный источник, иными словами — дымовая труба, которая выделяет загрязняющие вещества, сосредоточенные в одной точке.

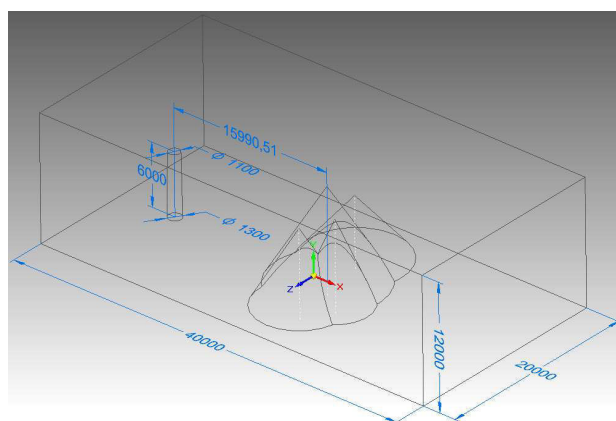
Для реализации модельных задач необходимо построить трёхмерную модель среды. Для её создания использовалась программа Solid Edge. Solid Edge — это набор простых программных инструментов, направленных на все процессы разработки изделия: 3D-проектирование, моделирование и производство. Благодаря синхронной технологии Solid Edge сочетает скорость и простоту прямого моделирования с гибкостью и контролем параметрического конструирования. Все рассмотренные модели выполнены в масштабе 1:20, имеют форму прямоугольного параллелепипеда, одинаковые геометрические размеры, содержат дымовую трубу (табл. 1).

Рассмотрим процесс распространения загрязнения в моделируемом объёме «Model 1» для плоского ландшафта с источником загрязнения — дымовая труба (рис. 1,а). «Model 2» представляет холмистый ландшафт, физическая высота холмов на уровне 175 м (рис. 1,б). Источник загрязнения находится на расстоянии 320 м. «Model 3» — квартал застройки на расстоянии 480 м от которого находится источник загрязнения. Высота зданий 14–80 м (рис. 1,в).

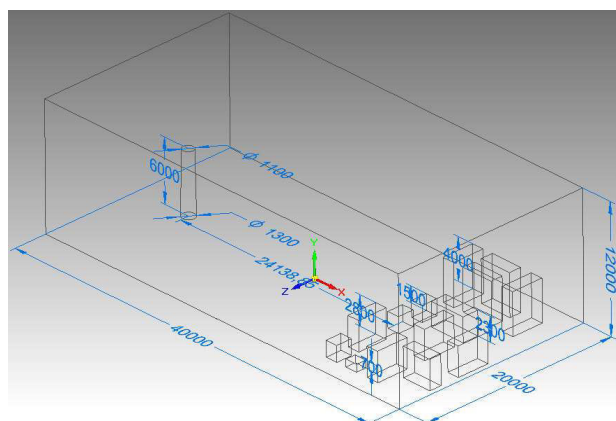
Для визуального моделирования процесса загрязнения атмосферы использовался программный комплекс ANSYS, который представляет собой универсальную программную систе-



а



б



в

Рис. 1. Геометрия объекта моделирования:
а — «Model 1»; б — «Model 2»; в — «Model 3»

му анализа, реализованную на методе конечных элементов. В ANSYS интегрировано приложение вычислительной гидродинамики CFD (Computational Fluid Dynamics), которое является частью CFX. CFX – это совокупность численных, теоретических и экспериментальных методов, предназначенных для моделирования течения жидкостей и газов, реагирующих потоков, процессов теплообмена [5]. Программные модули ANSYS интегрированы в рабочую плат-

форму ANSYS Workbench, которая является основой для предоставления комплексной и интегрированной системы моделирования.

В платформе Workbench проект представляется тремя блоками (рис. 2), которые заполняются методом переноса из меню инструментов Toolbox.

Блок Geometry содержит трёхмерную модель объекта моделирования процесса загрязнения. Блок Mechanical Model предназначен для

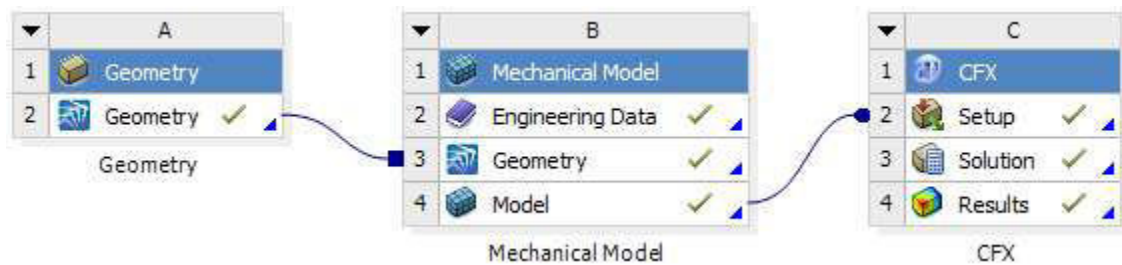


Рис. 2. Схематическое представление проекта

Таблица 2

Основные параметры CFX

Относительное давление атмосферы (Па)	Фрактальная интенсивность	Шкала длины вихря (м)	Скорость выделения загрязняющих веществ (м/с)	Коэффициент вихревой вязкости	Декартовы компоненты скорости (м/с)		
					x	y	z
0	0,5	0,25	0,1	10	1	0	0

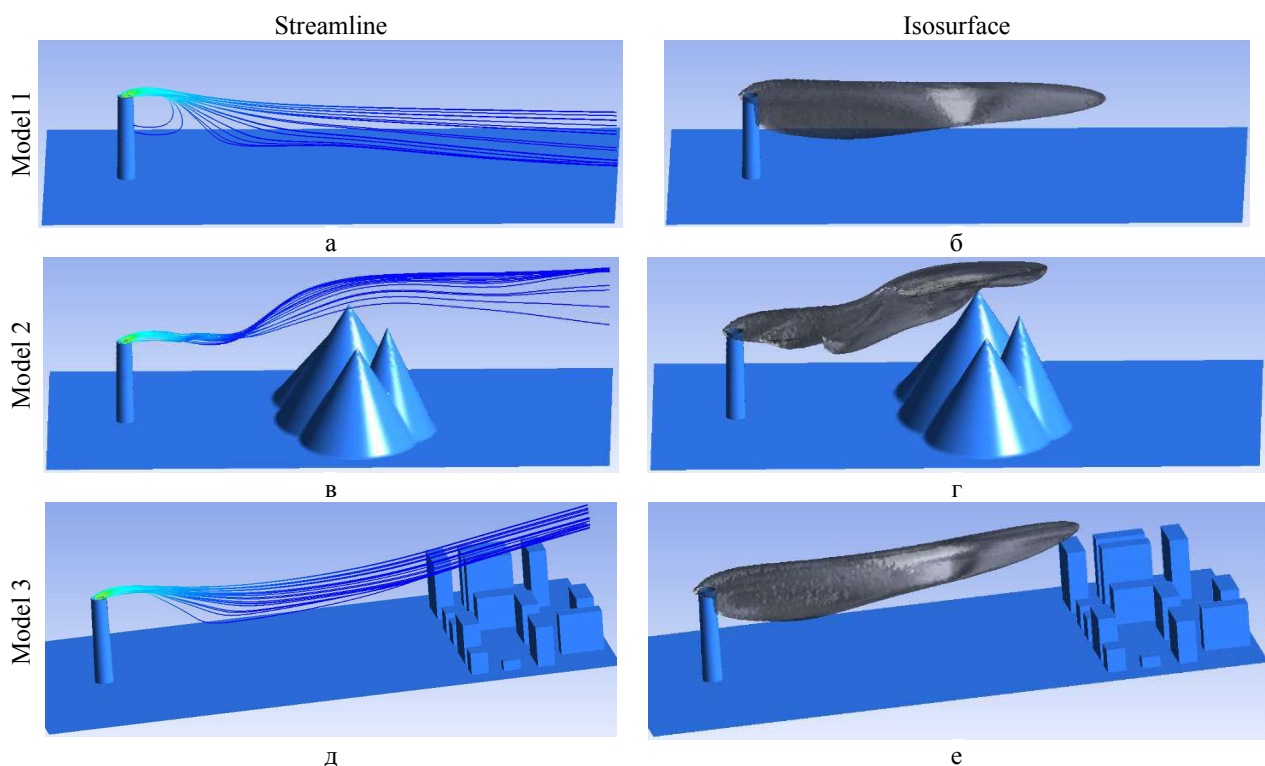


Рис. 3. Распределение загрязняющих веществ

задания механических свойств модели и зонирования на основании именованных наборов (Named Selections). Именованные наборы представляют собой плоскости с заданным именем, которые можно использовать в других интегрированных приложениях. После создания именованных наборов появляется возможность задать параметры для симуляции ветрового потока, выброса загрязняющих веществ и поведения атмосферы. Поскольку ANSYS – система конечно-элементного анализа, для трёхмерной модели необходимо создать полигональную сетку (Mesh), конечными элементами которой будут треугольники. Блок вычислительной гидродинамики (CFX) предназначен для задания параметров расчета (табл. 2).

В CFX входит предпроцессор, решатель и постпроцессор, который позволяет отобразить результаты расчета в виде распределения и потока концентрации загрязняющего вещества (рис. 3).

Анализ линии потоков (рис. 3,а,в,д) и изоповерхности (рис. 3,б,г,е) позволит исследовать поведение потока загрязняющих веществ при встрече с препятствием в виде элемента ландшафта или городской застройки. Результаты визуального моделирования подтверждают наличие восходящих потоков вблизи соответствующих элементов ландшафта.

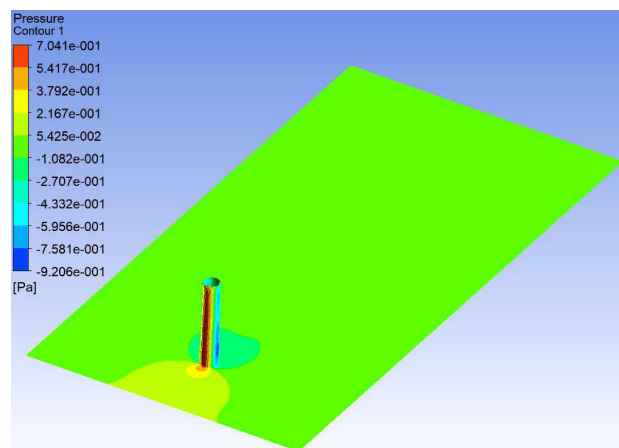
На рис. 4 приведен контур давления ветра для наклонных поверхностей (рис. 4,б) и плоскостей, находящихся во фронте к направлению ветра (рис. 4,в).

Численный анализ полученных расчетных данных возможен путем использования инструмента Probe с заданием координат тестовых точек (табл. 3). Высота точек взятия проб отличаются, поскольку поток загрязняющих веществ имеет разную траекторию.

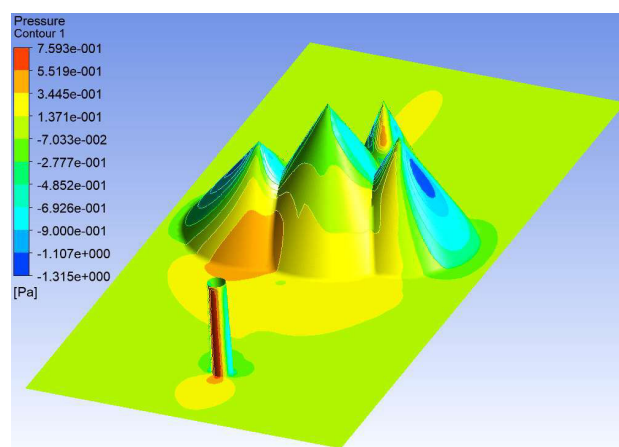
Все пробы были расположены вдоль траектории потока загрязняющих веществ на одинаковом расстоянии от трубы.

Выводы

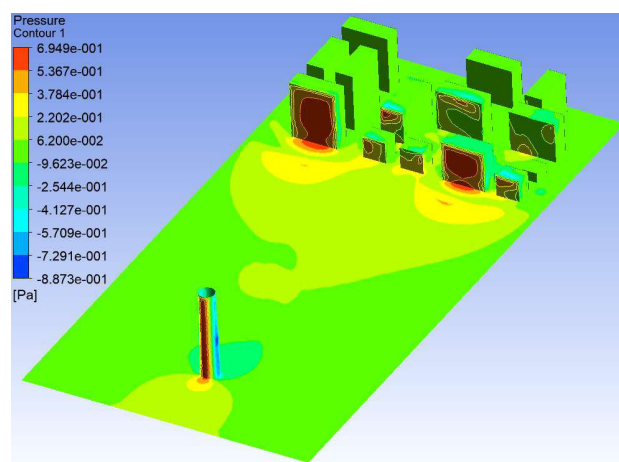
По результатам визуального моделирования возможно сделать вывод, что поведение траектории потока загрязняющих веществ меняется в зависимости от препятствий, встречающихся на пути. Как в модели с неровным рельефом (рис. 3,в), так и в модели с кварталом застройки (рис. 3,д) траектория подымается вверх. В исходном же варианте траектория стремится вниз (рис. 3,а). По результатам полученных численных данных, на основании взятия проб, путём взятия проб можно сделать вывод, что уро-



а



б



в

Рис. 4. Контур давлений:
а – «Model 1»; б – «Model 2»; в – «Model 3»

Таблица 3

Концентрация загрязнений

Модель	Точка взятия пробы	Концентрация (кг/м ³)	Высота (мм)
«Model 1»	Вентиляционное отверстие	0,989983	6000
	Середина потока	0,0589674	5700
	Конец потока	0,00229462	5000
«Model 2»	Вентиляционное отверстие	0,945833	6000
	Над препятствием	0,0180535	9700
	За препятствием	0,000503585	11000
«Model 3»	Вентиляционное отверстие	0,994091	6000
	Середина потока	0,0668258	6000
	Над кварталом застройки	0,00223406	8100

вень концентрации загрязняющих веществ сильно снижается с увеличением расстояния от дымовой трубы. Данные первой и третьей модели (табл. 3) весьма схожи. Однако, данные второй модели показывают, что при столкновении потока с препятствием концентрация существенно уменьшается. Высота квартала застройки недостаточна, чтобы повлиять на снижение уровня концентрации в третьей модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *IEA raises its five-year renewable growth forecast as 2015 marks record year* [Electronic resource] // International Energy Agency. — 2016. — Mode of access: <https://www.iea.org/newsroom/news/2016/october/iea-raises-its-five-year-renewable-growth-forecast-as-2015-marks-record-year.html>.
2. *Бойко В.В., Пляцук Л.Д.* Аналіз методів математичного моделювання розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері // Екологічна безпека. — Суми, 2010. — № 6. — С.1-4.
3. *Бабков В.С., Ткаченко Т.Ю.* Анализ математических моделей распространения примесей от точечных источников. // Информатика, кібернетика та обчислювальна техніка. — Донецьк, 2011. — № 13. — С.147-155.
4. *Наумов В.А.* Математическое моделирование распространения взвешенных примесей от точечного источника и их осаждение в водотоке. // Известия КГТУ. — Калининград, 2017. — № 44. — С.46-58.
5. *ANSYS CFX* [Electronic resource] // ANSYS. — Mode of access: <http://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx>.

Поступила в редакцию 01.11.2017

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАЕКТОРІЇ ПОШИРЕННЯ ЗАБРУДНЕНЬ ВІД ТОЧКОВОГО ДЖЕРЕЛА В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ХАРАКТЕРУ ЛАНДШАФТУ

Манукян А.А., Селівьорстова Т.В.

У даній роботі досліджено поведінку потоку забруднюючих речовин, в процесі їх поширення з димової труби. Це допоможе краще зрозуміти, яким чином відбувається забруднення повітря. За допомогою програми Solid Edge створені три тривимірні моделі для точкового джерела забруднення з різним типом рельєфу: рівний ландшафт, горбистий ландшафт і міська забудова, яка складається з будівель різних розмірів. Тривимірні моделі мають однакові геометричні розміри, димову трубу, а різний тип рельєфу допомагає дослідити поведінку потоку в різних умовах. На основі тривимірних моделей реалізовані модельні задачі з використанням програмного продукту ANSYS. Обчислення в програмному продукті ANSYS виконується за допомогою методу скінченних елементів. Створено полігональні сітки для тривимірних моделей для реалізації методу скінченних елементів. Показано, як змінюється траєкторія потоку домішок в залежності від характеру ландшафту. У моделі з рівним рельєфом траєкторія потоку забруднюючих речовин спрямована вниз. У моделі з горбистим ландшафтом після зіткнення з перешкодою траєкторія потоку забруднюючих речовин спрямована вгору. У моделі з міською забудовою після зіткнення з перешкодою траєкторія потоку забруднюючих речовин так само спрямована вгору. Виявлено, що міська забудова чинить менший вплив, ніж нерівний рельєф. Перш за все, це пов'язано з висотою перешкоди щодо висоти джерела забруднення. Зміна траєкторії потоку впливає на рівень концентрації забруднюючих речовин. Перша і третя моделі мають схожий рівень концентрації забруднюючих речовин. У другій моделі рівень концентрації забруднюючих речовин нижче. Встановлено, що рівень концентрації забруднюючих речовин значно знижується після зіткнення з горбистим ландшафтом, висота якого перевищує висоту димаря.

Ключові слова: моделювання, забруднення атмосфери, точкове джерело, домішки, ANSYS, обчислювальна гідродинаміка, метод скінченних елементів.

**RESEARCH OF THE TRAJECTORY OF POLLUTION
DIFFUSION FROM A POINT SOURCE DEPENDING ON
THE NATURE OF THE LANDSCAPE****Manukian A.A., Selivyorstova T.V.****National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine**

The behavior of the flow of pollutants during process of diffusion from a chimney is investigated in this paper. It will help to understand the process of air pollution better. By means of the Solid Edge program three three-dimensional models for a point source of pollution with different types of landscape are created: a flat landscape, a hilly landscape and an urban landscape, which consists of buildings of different sizes. Three-dimensional models have identical geometrical sizes, a chimney, and different types of landscape help to research behavior of a flow in different conditions. On the basis of three-dimensional models, model problems are implemented using ANSYS software. Computation in the software product ANSYS are performed using the finite element method. Polygon meshes for three-dimensional models are created for implementation of the finite element method. The changes in trajectory of the pollutants flow depending on the nature of the landscape were shown. In the model with a flat landscape, the path of the pollutant flow is directed downward. In the model with a hilly landscape, after collision with an obstacle, the trajectory of the pollutant flow is directed upward. It is revealed that urban development exerts less influence, than an unsmooth landscape. First of all, it depends on the height of the obstacle relative to the height of the source of pollution. The change in the flow trajectory influences the level of concentration of pollutants. The first and third models have a similar level of concentration of pollutants. In the second model the level of concentration of pollutants is lower. It was stated that the concentration level of pollutants considerably decreased after the collision with a hilly landscape that exceeds chimney height.

Keywords: modeling, air pollution, point source, impurities, ANSYS, computational fluid dynamics, finite element method.

REFERENCES

1. IEA raises its five-year renewable growth forecast as 2015 marks record year. (2016, October 25). Available at: <https://www.iea.org/newsroom/news/2016/october/iea-raises-its-five-year-renewable-growth-forecast-as-2015-marks-record-year.html>.
2. Boiko V.V., Pliatsuk L.D. Analiz metodiv matematychnoho modeliuвання rozpovsiudzhennia zabrudnuiuchykh rehovyn v atmosferi [The analysis of mathematical modeling methods of pollutants diffusion in the atmosphere]. *Ekolohichna bezpeka*, Sumy, 2010, vol. 6, pp. 1-4. (in Ukrainian).
3. Babkov V.S., Tkachenko T.Yu. Analiz matematicheskikh modeley rasprostraneniya primesey ot tochechnykh istochnikov [The analysis of mathematical models of diffusion of impurities from point sources]. *Informatyka, kibernetika ta obchysluvalna tekhnika*, Donetsk, 2011, vol. 13, pp. 147-155. (in Russian).
4. Naumov V.A. Matematicheskoye modelirovaniye rasprostraneniya vzveshenykh primesey ot tochechnogo istochnika i ikh osazhdeniye v vodotoke. [Mathematical modeling of distribution of suspended impurities from a point source and its deposition in the watercourse]. *Izvestiya KGTU, Kaliningrad*, 2017, vol. 44, pp. 46-58 (in Russian).
5. ANSYS CFX (n.d.). Available at: <http://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx>.

*Мусаев В.Г.***МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ****Азербайджанский Технический Университет, г. Баку, Азербайджан**

Известно, что для расчета и исследования динамических процессов в системах с распределенными параметрами выражение для γ , содержащее коэффициент затухания, раскладывается в ряд Тейлора и берется два члена ряда. В связи с этим в данной работе рассматривается оценка погрешности, получаемой при этом допущении. Отметим, что при разложении в ряд выражения для γ , от реальной системы с распределенными параметрами переходим к сбалансированной системе и коэффициент αT в зависимости от специфики конкретных объектов, получает разные значения. Проведенные исследования показывают, что чем больше значение αT , тем больше в установившемся режиме значение функции отклоняется от значения ω , соответствующего установившемуся режиму несбалансированного звена. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о том, что разложенные в ряд выражения для коэффициента γ справедливы только при малых значениях αT . В работе проф. Я.Б. Кадымова посредством аппроксимации бесконечного ряда Бесселевых рядов функций первого рода нулевого порядка, при переходе от изображения к оригиналу (при $x=0$), получено такое решение телеграфного уравнения в виде решетчатых функций, которое позволяет рассчитывать переходные процессы в электроприводах и системах автоматического регулирования, включающих звенья с распределенными параметрами, при учете потерь с погрешностью, не превышающей 5%. Однако в ряде практических задач при решении проблемы динамики объектов с распределенными параметрами возникает необходимость исследовать переходные процессы исходной системы в любой точке в любой момент времени. Исходя из вышеизложенного, в данной работе предлагается численный метод расчета переходных процессов в любой точке систем с распределенными параметрами, описываемых телеграфными уравнениями. Предложенный метод вычисления переходных процессов в системах с распределенными параметрами является дискретным.

Ключевые слова: распределенный параметр, телеграфные уравнения, магистральные трубопроводы, сбалансированное звено.

Постановка проблемы

Известно, что динамические процессы в системах с распределенными параметрами, яркими примерами которых являются магистральные трубопроводы [1,2], длинные линии электропередачи, штанги глубиннонасосных установок и т.д., в общем виде описываются системой дифференциальных уравнений в частных производных [1]:

$$\begin{cases} -\frac{\partial P(x,t)}{\partial x} = k_1 \frac{\partial \omega(x,t)}{\partial t} + k_3 \omega(x,t); \\ -\frac{\partial \omega(x,t)}{\partial x} = k_2 \frac{\partial P(x,t)}{\partial t} + k_4 P(x,t), \end{cases} \quad (1)$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 — вещественные коэффициенты, зависящие от свойства системы.

Анализ последних исследований и публикаций

В работе [3] посредством аппроксимации бесконечного ряда Бесселевых рядов функций первого рода нулевого порядка, при переходе от изображения к оригиналу (при $x=0$), получено такое решение телеграфного уравнения в виде решетчатых функций, которое позволяет рассчитывать переходные процессы в электроприводах и системах автоматического регулирования, включающих звенья с распределенными параметрами, при учете потерь с погрешностью, не превышающий 5%. Однако в ряде практических задач при решении проблемы динамики объектов с распределенными параметрами (тру-

бопроводов, длинных стержней, линий электропередачи и др.) возникает необходимость исследовать переходные процессы исходной системы в любой точке в любой момент времени.

Формулирование целей статьи (постановка задачи)

Поэтому в данной работе развивается и обобщается метод [3] для исследования переходных процессов в системах с распределенными параметрами, описываемых телеграфными уравнениями, в любой точке в любой момент времени.

Проведенные исследования показывают, что результаты расчета нестационарных процессов, полученные путем численного решения методом, основанным на теории импульсных систем, с учетом влияния приводного двигателя показывают, что этот метод позволяет получить результаты, весьма близкие к экспериментальным, предложенный метод дает возможность определить изменение давления или расхода в любой точке трассы в любой момент времени и не представляет особых трудностей как при составлении и отладке программы, так и при расчете.

Изложение основного материала исследования

Следует отметить, что выражения для γ , содержащее коэффициент затухания (потерь) разлагается в ряд Тейлора и берется два члена ряда. При этом, выражение для γ после разложения получается:

$$\gamma = (s + \alpha) \frac{\tau}{\ell}. \quad (2)$$

Однако выражение для коэффициента распространения и волнового сопротивления в общем случае имеет вид:

$$2\gamma\ell = T\sqrt{(s + \alpha)^2 + \beta^2}, \quad b = \sqrt{\frac{sk_1 + k_3}{sk_2 + k_4}}, \quad (3)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{k_3}{k_1} + \frac{k_4}{k_2} \right), \quad \beta = \frac{1}{2} \left(\frac{k_3}{k_1} - \frac{k_4}{k_2} \right). \quad (4)$$

В связи с этим в данной работе рассматривается оценка погрешности, получаемой при этом допущении.

В задачах динамики магистральных трубопроводов коэффициент, учитывающий на единицу длины $k_4=0$. При этом, как в частном случае, получается объект с распределенными параметрами, когда $\alpha=\beta$.

Из теории исследования звеньев с распре-

деленными параметрами известно, что в сбалансированных звеньях с распределенными параметрами коэффициент $\beta=0$, при этом имеет место следующее соотношение параметров

$$\frac{k_3}{k_1} = \frac{k_4}{k_2}. \quad (5)$$

Коэффициент b оказывается равным тому значению, что и для звена без потерь $b = \sqrt{\frac{k_1}{k_2}}$, а

коэффициент распространения $\gamma = (s + \alpha) \frac{\tau}{\ell}$.

Отметим, что, как при разложении в ряд выражения для γ , от реальной системы с распределенными параметрами переходим к сбалансированной системе и коэффициенту αT в зависимости от специфики конкретных объектов, в частности, магистральных трубопроводов, получаем разные значения, необходимо показать, при каких пределах значения коэффициента αT достоверен этот подход.

Как известно, при нулевых начальных условиях операторное выражение для ω в сбалансированном звене имеет следующий вид [3]:

$$\omega(s) = \frac{P_1}{b} \frac{e^{-(s+\alpha)\frac{\tau}{\ell}x} + e^{\phi_1 - 2s\tau} \cdot e^{(s+\alpha)\frac{\tau}{\ell}x}}{1 - e^{\phi_1} e^{-2s\tau}}, \quad (6)$$

где $e^{\phi_1} = e^{\phi} \cdot e^{-\alpha T}$, $\alpha = \frac{k_3}{k_1}$.

При $e^{\phi} = -1$ решение уравнения (6) в области оригиналов для начальной точки ($x=0$) имеет вид:

$$\omega[n, \varepsilon] = \frac{P_1}{b} \frac{1}{1 + e^{-\alpha T}} \left[1 - e^{-\alpha T} + 2e^{-\alpha T(n+\varepsilon+1)} \cos An \right]. \quad (7)$$

Задавая значения $n=0,1,2,\dots$, (при этом ε получает значение $0 \leq \varepsilon \leq 1$), при различных значениях αT можно получить графики изменения функции (7).

Проведенные исследования показывает, что чем больше значение αT , тем больше в установившемся режиме значение функции отклоняется от значения ω , соответствующего установившемуся режиму несбалансированного звена.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о том, что разложенные в ряд выражения для коэффициента γ справедливы только при малых значениях αT .

Необходимо отметить, что в данной рабо-

те при выборе периода повторения решетчатой функции T используется параметр λ , который получает различные значения от 1 до n . При этом новый период повторения выбирается из условия $T = T/\lambda$. Выбором параметра λ , можно получить различные периоды повторения решетчатой функции и значения параметра αT , не превышающие допустимого.

Исходя из вышеизложенного в данной работе предлагается численный метод расчета переходных процессов в любой точке систем с распределенными параметрами, описываемых телеграфными уравнениями.

Так, например, решение телеграфного уравнения при принятых начальных и граничных условиях в общем виде ($P \neq \text{const}$) в операторной форме относительно функции w при $e^{\psi} = -1$ имеет вид:

$$\bar{\omega}(\delta, s) = \frac{e^{-2\gamma\ell\delta} - e^{-2\gamma\ell(1-\delta)}}{1 + e^{-2\gamma\ell}} \frac{\bar{P}(s)}{\bar{b}(s)}, \quad (8)$$

где $\delta = x/2l$.

Выражение (8) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \frac{1}{s}(1 + e^{-2\gamma\ell})\bar{\omega}(\delta, s) &= \\ &= \frac{1}{s} \frac{1}{b(s)} [e^{-2\gamma\ell\delta} - e^{-2\gamma\ell(1-\delta)}] \bar{P}(s). \end{aligned} \quad (9)$$

Обозначая в выражении (9) $\bar{k}_1(s) = \frac{1}{2}e^{-2\gamma\ell}$,

$\bar{k}_2(s) = \frac{1}{sb(s)}e^{-2\gamma\ell\delta}$, $\bar{k}_3(s) = \frac{1}{sb(s)}e^{-2\gamma\ell(1-\delta)}$, получим:

$$\bar{\omega}(\delta, s) = \left(\frac{1}{s} + \bar{k}_1(s) = (\bar{k}_2(s) - \bar{k}_3(s)) \right) \bar{P}(s). \quad (10)$$

Выражение (10) в области оригиналов, согласно теоремы свертки [4,5], имеет вид:

$$\begin{aligned} \omega[\delta, \pi] &= \sum_{m=\lambda\delta}^{\pi} k_2[m]P[n-m] - \\ &- \sum_{m=\lambda(1-\delta)}^n k_3[m]P[n-m] - \\ &- \sum_{m=\lambda}^n k_1[m]\omega[n-m, \delta] - \sum_{m=0}^{n-1} \omega[m, \delta]. \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{где } k_2[n] = \begin{cases} 0, \text{ при } n \leq \lambda\delta; \\ e^{-\alpha T\delta} + \alpha T\delta \sum_{m=\lambda\delta}^n e^{-\frac{\alpha T}{\lambda}m} \times \\ \times \frac{I_1\left(\frac{\alpha T}{\lambda}, \sqrt{m^2 - (\lambda\delta)^2}\right)}{\sqrt{m^2 - (\lambda\delta)^2}}, \\ \text{при } n > \lambda\delta; \end{cases}$$

$$k_2[n] = e^{\frac{\alpha T}{\lambda}n} I_0\left(\frac{\alpha T}{\lambda} \sqrt{n^2 - (\lambda\delta)^2}\right);$$

$$k_3[n] = e^{-\frac{\alpha T}{\lambda}n} I_0\left(\frac{\alpha T}{\lambda} \sqrt{n^2 - [(1-\delta)\lambda]^2}\right),$$

где $I_1(\alpha, t)$ – бесселевые функции первого порядка от вещественного аргумента.

Аналогичным образом функции $\bar{P}(\delta, s)$ в общем виде можно представить:

$$\bar{P}(\delta, s) = \frac{e^{-2\gamma\ell\delta} + e^{-2\gamma\ell(1-\delta)}}{1 - e^{-2\gamma\ell}} \bar{P}(s). \quad (12)$$

В области оригиналов:

$$\begin{aligned} P[\delta, n] &= \sum_{m=\lambda\delta}^n k_2'[m]P[n-m] - \\ &- \sum_{m=\lambda(1-\delta)}^n k_1'[m]P[n-m] - \\ &- \sum_{m=\lambda}^n k_1'[m]P[n-m, \delta] - \sum_{m=0}^{n-1} P[m, \delta], \end{aligned} \quad (13)$$

$$k_2'[n] = \begin{cases} 0, \text{ при } n \leq \lambda\delta; \\ e^{-\alpha T\delta} + \alpha T\delta \sum_{m=\lambda\delta}^n e^{-\frac{\alpha T}{\lambda}m} \times \\ \times \frac{I_1\left(\frac{\alpha T}{\lambda}, \sqrt{m^2 - (\lambda\delta)^2}\right)}{\sqrt{m^2 - (\lambda\delta)^2}}, \\ \text{при } n > \lambda\delta; \end{cases}$$

где

$$k_2'[n] = \begin{cases} 0, \text{при } n \leq \lambda\delta; \\ e^{-\alpha T\delta} + \alpha T\delta \sum_{m=\lambda\delta}^n e^{-\frac{\alpha T}{\lambda}m} \times \\ I_1\left(\frac{\alpha T}{\lambda}, \sqrt{m^2 - (\lambda\delta)^2}\right) \times \\ \frac{1}{\sqrt{m^2 - (\lambda\delta)^2}}, \\ \text{при } n > \lambda\delta; \end{cases}$$

$$k_1'[n] = k_1[n];$$

$$k_3'[n] = \begin{cases} 0, \text{при } m \leq (1-\lambda\delta); \\ e^{-\alpha T(1-\delta)} + \alpha T(1-\delta) \times \\ \sum_{m=\lambda(1-\delta)}^n e^{-\frac{\alpha T}{\lambda}m} \frac{I_1\left(\frac{\alpha T}{\lambda}, \sqrt{m^2 - [(1-\delta)\lambda]^2}\right)}{\sqrt{m^2 - [(1-\delta)\lambda]^2}}, \\ \text{при } m > (1-\lambda\delta). \end{cases}$$

Из выражений для $k_1[n]$, $k_2'[n]$, $k_3'[n]$ видно, что при $m=\lambda$, $m=\lambda\delta$, $m=(1-\delta)\lambda$ на фронте волны имеет соответственно $k_1[n]=e^{-\alpha T}$, $k_2'[n]=e^{-\alpha T\delta}$, $k_3'[n]=e^{-\alpha T(1-\delta)}$.

В частном случае, при $P=\text{const}$ выражения (8) и (12) примут вид:

$$\bar{\omega}(\delta, s) = \frac{1}{b(s)} \frac{e^{-2\gamma\ell\delta} - e^{-2\gamma\ell(1-\delta)}}{1 - e^{-2\gamma\ell}} \frac{P_0}{s}; \quad (14)$$

$$\bar{P}(\delta, s) = \frac{P_0}{s} \frac{e^{-2\gamma\ell\delta} + e^{-2\gamma\ell(1-\delta)}}{1 + e^{-2\gamma\ell}}. \quad (15)$$

Выражения (14) и (15) в области оригиналов имеют вид:

$$\omega[\delta, n] = \sum_{m=\lambda\delta}^n k_2[m] - \sum_{m=\lambda(1-\delta)}^n k_3[m] - \sum_{m=0}^{n-1} \omega[m, \delta] - \sum_{m=\lambda}^{n-1} k_1[n-m] \omega[m, \delta]; \quad (16)$$

$$P[\delta, n] = \sum_{m=\lambda\delta}^n k_2'[m] - \sum_{m=\lambda(1-\delta)}^n k_3'[m] - \sum_{m=\lambda}^n k_1'[m] - \sum_{m=0}^{n-1} P[m, \delta] \cdot l[n-m]. \quad (17)$$

Задавая значения $x=0 \div \ell$ согласно выражениям (11), (13), (16), (17), можно рассчитать переходные процессы в системах с распределенными параметрами при произвольных и скачкообразных возмущающих воздействиях в любой точке при учете потерь.

Выводы

Предложенный метод вычисления переходных процессов в системах с распределенными параметрами является дискретным.

Описанная методика, исключая операции приведения систем с распределенными параметрами к замкнутой импульсной системе, существенно упрощает математические выкладки по определению передаточных функций и сокращает объем вычислений. Методика позволяет свести решение сложной задачи по переходным процессам в системе с распределенными параметрами к достаточно простым алгоритмам легко реализуемых на современных вычислительных системах, при этом используются стандартные программы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мусаев В.Г. Идентификация и управление сложными системами с распределенными параметрами (на примере магистральных нефтепроводов) // Информационные технологии моделирования и управления. – Воронеж, 2013. – № 3 (81). – С.268-277.
2. Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. – М.: Недра, 1975. – 296 с.
3. Кадымов Я.Б. Переходные процессы в системах с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1968. – 192 с.
4. Диткин В.А., Прудников А.П. Справочник по операционному исчислению. – М.: Высшая школа, 1965. – 465 с.
5. Musayev V.H., Huseynov N.E. Analysis of the operation of the systems with distributed parameters with the adjusting system objects // International Transaction of Electrical and Computer Engineers System. – 2015. – Vol. 3. – No. 1. – p.30-33.

Поступила в редакцию 02.10.2017

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМАХ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Мусаєв В.Г.

Відомо, що для розрахунку і дослідження динамічних процесів в системах з розподіленими параметрами виразу для γ , який містить коефіцієнт згасання, розкладається в ряд Тейлора і береться два члена ряду. У зв'язку з цим в даній роботі розглядається оцінка похибки, одержуваної при цьому допущенні. Відзначимо, що при розкладанні в ряд виразу для γ , від реальної системи з розподіленими параметрами переходимо до збалансованої системи і коефіцієнта αT в залежності від специфіки конкретних об'єктів, отримує різні значення. Здійснені дослідження показують, що чим більше значення αT , тим більше в сталому режимі значення функції відхиляється від значення ω , що відповідає сталому режиму незбалансованої ланки. Виходячи з вищесказаного, можна зробити висновок про те, що розкладання в ряд виразу для коефіцієнта γ справедливо тільки при малих значеннях αT . В роботі проф. Я.Б. Кадимова за допомогою апроксимації нескінченного ряду Бесселевих рядів функцій першого роду нульового порядку, при переході від зображення до оригіналу (при $x=0$), отримано таке рішення телеграфного рівняння у вигляді гратчастих функцій, яке дозволяє розраховувати перехідні процеси в електроприводах і системах автоматичного регулювання, що включають ланки з розподіленими параметрами, при обліку втрат з похибкою, що не перевищує 5%. Однак в низці практичних задач при розв'язанні проблеми динаміки об'єктів з розподіленими параметрами виникає необхідність дослідити перехідні процеси вихідної системи в будь-якій точці в будь-який момент часу. Виходячи з вищевикладеного, в даній роботі пропонується чисельний метод розрахунку перехідних процесів в будь-якій точці систем з розподіленими параметрами, які описуються телеграфними рівняннями. Запропонований метод обчислення перехідних процесів в системах з розподіленими параметрами є дискретним.

Ключові слова: розподілений параметр, телеграфні рівняння, магістральні трубопроводи, збалансована ланка.

MATHEMATICAL MODELING OF DYNAMIC PROCESSES IN SYSTEMS WITH DISTRIBUTED PARAMETERS

Musayev V.H.

Azerbaijan Technical University, Baku, Republic of Azerbaijan

In this paper, a discrete method is developed and generalized for the study of transient processes in systems with distributed parameters described by telegraph equations, at any point at any time. In this connection, in this paper, we consider the estimation of the error obtained with this assumption. We note that when we expand the expressions for γ , from a real system with distributed parameters we pass to a balanced system, and the coefficient αT , depending on the specifics of particular objects, in particular, the main pipelines, gets different values. The conducted research shows that the higher the value αT is, the more the function value deviates in the steady state from the value ω corresponding to the steady state of the unbalanced link. Proceeding from the foregoing, we can conclude that the expansion in a series of expressions for the coefficient γ is valid only for small values of αT . In the work of prof. Y.B. Kadimov, by approximating an infinite series of Bessel series of functions of the first kind of zero order, when passing from the transform to the original (at $x=0$), a solution of the telegraph equation in the form of lattice functions is obtained. It makes possible to calculate transient processes in electric drives and automatic control systems, including links with distributed parameters, with allowance for losses, with an error not exceeding 5%. However, in a number of practical tasks when solving the problem of the dynamics of objects with distributed parameters, it becomes necessary to investigate the transient processes of the initial system at any point at any time. Proceeding from the foregoing, in this paper, we propose a numerical method for calculating transient processes at any point of systems, with distributed parameters described by telegraph equations. The proposed method for calculating transient processes in systems with distributed parameters is discrete.

Keywords: distributed parameter, telegraph equations, main pipelines, balanced link.

REFERENCES

1. Musaev V.G. Identifikatsiya i upravlenie slozhnyimi sistemami s raspredelennymi parametrami (na primere magistralnykh nefteprovodov) [Identification and management of complex systems with distributed parameters (for example, oil trunk-lines)]. *Informatsionnyie tehnologii modelirovaniya i upravleniya*, Voronezh, 2013, № 3 (81), pp. 268-277. (in Russian).
2. Charnyy I.A. Neustanovivsheesya dvizhenie realnoy zhidkosti v trubah [Unsteady motion of a real liquid in pipes]. Nedra, Moscow, 1975. 296 p. (in Russian).
3. Kadyimov Ya.B. Perehodnyie protsessyi v sistemah s raspredelennymi parametrami [Transients in systems with distributed parameters]. Nauka, Moscow, 1968. 192 p. (in Russian).
4. Ditkin V.A., Prudnikov A.P. Spravochnik po operatsionnomu ischisleniyu [Handbook of operational calculus]. Vysshaya shkola, Moscow, 1965. 465 p. (in Russian).
5. Musayev V.H., Huseynov N.E. Analysis of the operation of the systems with distributed parameters with the adjusting system objects. *International Transaction of Elektrikal and Computer Engineers System*, 2015, vol. 3, no. 1, pp. 30-33.

УДК 004.02

*Петренко К.М., Манко Г.І.***АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ
УПРАВЛІННЯ****ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, Україна**

В даній роботі розглянуті питання автоматизації процесу ідентифікації динамічних об'єктів. Досліджено використання комп'ютерних технологій для забезпечення автоматизації процесів ідентифікації об'єктів управління. Виконаний аналіз існуючих методів оцінки адекватності моделей, що отримуються в ході ідентифікації, відмічені обмеження застосування цих методів. Обґрунтовано використання інформаційного підходу при розв'язанні задач оцінювання адекватності математичних моделей. Запропоновано використання універсальної, придатної при будь-якому методі ідентифікації інформаційного оцінювання адекватності на основі поняття корисної інформації Бонгарда. Наведені формули зручні для практичного використання при порівняльному оцінюванні точності моделей об'єктів управління різного типу. Описаний процес проектування графічного інтерфейсу користувача – Graphical User Interface (GUI) в спеціалізованому середовищі GUIDE системи MATLAB. Спроектований GUI дозволяє в інтерактивному режимі з максимальною мірою автоматизації виконувати ідентифікацію динамічних об'єктів. При цьому створення моделі і оцінювання її адекватності здійснюється з використанням різних методів. Розроблені сценарії і функції GUI вводять дані експериментальних досліджень динамічного об'єкта, усереднюють, нормалізують і виконують їх апроксимацію передатною функцією першого, другого, третього або четвертого порядку, виконують побудову графіків кривих розгону об'єкта і кривої відгуку моделі. Апроксимація здійснюється використанням функції мінімізації з обмеженнями $fmincon$. Наведені фрагменти функцій, що здійснюють апроксимацію кривої розгону об'єкта і розрахунок значень інформаційного критерію адекватності. Пересуванням слайдерів GUI можна коригувати модель, домагаючись бажаного виду кривої відгуку і контролюючи при цьому значення критерію адекватності. Використання GUI забезпечує побудову високоточних моделей динамічних об'єктів управління з мінімальними витратами часу. Використання інформаційного критерію адекватності дозволяє вибрати найбільш адекватну модель.

Ключові слова: графічний інтерфейс, ідентифікація, адекватність, комп'ютерні технології, крива розгону, передатна функція.

Постановка проблеми

Побудова якісної автоматизованої системи управління починається з ідентифікації об'єкта управління. В ході експериментального дослідження об'єкта управління будується крива розгону. Для її отримання треба на вхід об'єкта здійснити ступінчастий вплив. Визначають чинник, який впливає на регульовану величину, наприклад, температуру можна регулювати зміною подачі граючої пари. Стрибком змінюють вхідну дію на 10–20 відсотків ходу виконавчого механізму і спостерігають за зміною регульованої ве-

личини. Далі треба створити математичну модель, перехідний процес у якій при ступінчастій зміні вхідної величини якнайкраще співпадає з експериментальною кривою розгону. Найчастіше використовується модель у вигляді передатної функції n -го порядку:

$$W(s) = \frac{b_m \cdot s^m + b_{m-1} \cdot s^{m-1} + \dots + b_1 \cdot s + b_0}{a_n \cdot s^n + a_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + a_1 \cdot s + a_0} \quad (1)$$

або матрична модель у просторі станів наступ-

ного вигляду:

$$X' = AX + BU;$$

$$Y = CX + DU. \quad (2)$$

Процес ідентифікації складається у виборі порядку моделі, а також у визначенні значень коефіцієнтів a_i та b_i або матриць коефіцієнтів A , B , C і D .

Виникає задача, по-перше, максимально автоматизувати цей процес, по-друге, надати можливість корекції коефіцієнтів для отримання бажаного перехідного процесу моделі, по-третє, забезпечити порівняльне оцінювання адекватності моделей для вибору кращої з них.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Теорія ідентифікації динамічних об'єктів широко надана в науковій літературі. Значний вклад внесли Р. Ейкгофф, А. Седж, І. Задех, А.М. Дейч, В.В. Кафаров, Н.С. Райбман, Я.З. Ципкін та ін.

Загальні питання філософії та методології процесів ідентифікації і адекватності математичних і комп'ютерних моделей розглянуті в [1]. Окрема увага приділена питанням оцінювання невизначеності, яка ускладнює процес обґрунтування правильності моделей, створюючи ситуацію, в якій ані модельована, ані спостережувана поведінка системи не відома з упевненістю.

Н.С. Райбман виконав огляд методів ідентифікації, розроблених в Інституті проблем управління [2]. Це, переважно, теоретичні розробки. Особливу увагу в ньому приділено АСІ — адаптивним системам управління з ідентифікатором у колі зворотного зв'язку.

Питання оцінювання динамічних параметрів специфічних об'єктів — аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) — розглядаються в роботі [3]. Описується апаратно-програмна реалізація автоматизованої системи оцінювання динамічних параметрів АЦП.

У статті [4] отримані аналітичні вирази, що дозволяють визначити динамічні характеристики об'єктів управління за параметрами перехідних функцій замкнутих систем. Проте автоматизація такого процесу вкрай ускладнена.

У роботі [5] розглянуті особливості ідентифікація об'єктів управління засобами Toolbox PID Tuner у середовищі MATLAB. Треба зазначити, що такий підхід накладає низку обмежень. Наприклад, обмежений вибір структури передатної функції такими варіантами:

— один дійсний корінь (перший порядок);

— два дійсні корені (другий порядок);

— два комплексно зв'язаних кореня (другий порядок);

— два комплексно зв'язаних кореня і один дійсний корінь (третій порядок).

Указується, що автоматична ідентифікація не завжди дає задовільні результати.

Низка публікацій присвячена проблемам оцінювання адекватності моделей динамічних об'єктів.

О.М. Трунов [6] дає огляд робіт, присвячених пошуку загальних закономірностей добору критеріїв встановлення адекватності, в яких використовуються для цього різні поняття та способи кількісного виміру, а також різні міри близькості моделі до ідентифікованого об'єкта. Автор справедливо констатує, що вибір практичної реалізації процесу апроксимації суттєво ускладнюється у силу відсутності єдиного способу виміру адекватності, і пропонує використання «єдиного виразу оцінювання адекватності, що дозволяє враховувати декілька факторів впливу та запропонувати вирази для їх розрахунку». Пропонується як оцінювання нижньої границі величини адекватності використовувати показник ефективності процесу побудови моделі, зворотно пропорційний до середньо-квадратичного відхилення (СКВ) моделі від експериментальних значень. Такий підхід не можна вважати зовсім коректним, оскільки ідентифікація звичайно відбувається методом найменших квадратів, тобто і отримання моделі і її оцінювання здійснюються однаково — з визначенням квадрату різниці вихідних сигналів об'єкта і моделі. До того ж вибір критичного значення оцінки точності моделі за методом найменших квадратів пов'язаний, як правило, з цільовим призначенням моделі, при цьому односторонньо не вирішується.

Дисперсійні методи оцінювання адекватності відомі з середини минулого сторіччя. Вони отримують подальший розвиток і у наш час. Е.П. Черногоров визначає, що модель системи дозволяє нам моделювати деяку генеральну сукупність. Маючи окремий експеримент, відтворюючий «життя» деякої системи, ми можемо стверджувати, що маємо окрему реалізацію цієї генеральної сукупності. На моделі, відтворюючи умови експерименту, ми також отримуємо реалізацію генеральної сукупності. Кількісне оцінювання адекватності полягає в перевірці статистичних гіпотез про приналежність цих реалізацій одній і тій же генеральній сукупності.

Треба зауважити, що використання диспер-

сійних критеріїв адекватності суворо справедливе лише для випадку нормального розподілу ймовірностей значень вихідних змінних моделі. На практиці закон розподілу вихідної змінної може істотно відрізнятися від нормального. В цьому випадку виникає значна похибка при розрахунку міри точності моделі. Крім того, дисперсійні оцінювання типу критерію Фішера [7] не можуть бути використані для порівняльного оцінювання точності моделей, побудованих для об'єктів, які істотно відрізняються один від одного.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є створення програмного додатка, що дозволяє в інтерактивному режимі з максимальним ступенем автоматизації виконувати ідентифікацію динамічних об'єктів. При цьому процеси створення моделі та оцінювання її адекватності мають відбуватись з використанням різних підходів.

Інформаційний підхід до оцінювання адекватності

Універсальна інформаційна оцінка адекватності застосовується при будь-якому методі ідентифікації і дозволяє порівнювати точність моделей, які істотно відрізняються одна від одної методом отримання (аналітичним або експериментальним), характером (детерміновані або стохастичні моделі), конкретною реалізацією (фізичні або математичні моделі) і іншими ознаками, була запропонована в [8].

Згідно з М.М. Бонгарду [9], повідомлення, що змінює для спостерігача невизначеність N_1 на невизначеність N_2 , несе корисну інформацію:

$$I_n = N_1 - N_2. \quad (3)$$

Для спостерігача, що виходить з гіпотези, що деяке завдання характеризується розподілом імовірності відповіді $\{q_j\}$, тоді як реальним є розподіл $\{p_j\}$, невизначеність оцінюється виразом:

$$N_2 = -\sum_j p(x_j) \log q(y_j). \quad (4)$$

Вважатимемо, що до ідентифікації невизначеність динамічного об'єкта оцінюється інформаційною ентропією Шенона:

$$N_1 = H = -\sum_j p_j \log p_j. \quad (5)$$

Оскільки модель завжди дає лише наближений опис об'єкта, можна говорити про дезінформацію, що вноситься моделлю. Якщо ре-

альний вихідний змінний об'єкта у відповідає вихідна змінна моделі $\check{y}$, а реальному розподілу ймовірностей $P=\{p(y_j)\}$ значень величини у відповідає гіпотетичний розподіл $Q=\{q(\check{y}_j)\}$, що задається моделлю, то дана модель несе дослідникові дезінформацію в кількості:

$$D = N_2 - N_1 = \sum_j p(y_j) \log[p(y_j)/q(\check{y}_j)]. \quad (6)$$

Вираз (6) є інформаційним критерієм адекватності.

У задачах синтезу систем автоматичного регулювання звичайно виконується експериментальне дослідження динаміки об'єкта управління з побудовою розгонної характеристики. Графік зміни регульованої величини апроксимують моделлю у вигляді передатної функції певного порядку з чистим запізненням. Оскільки при цьому доводиться мати справу з детермінованими процесами, використання критерію (6) є неможливим.

В цьому випадку треба використовувати підхід, запропонований в роботі [10] для оцінювання кількості інформації в детермінованому процесі. Тут було показано, що інформаційна насиченість детермінованого сигналу $y(t)$ залежить від інтенсивності його зміни, величиною, що характеризується:

$$\pi_y(t) = \frac{\left| \frac{dy}{dt} \right|}{\varepsilon_y}, \quad (7)$$

де ε_y — поріг розрізняваності значень $y(t)$. Оскільки в системах управління застосовуються, як правило, цифрові пристрої, як поріг розрізняваності доцільно використовувати крок квантування.

Як міра інформації в детермінованому процесі використовується інтегральна характеристика мінливості (ІХМ) змінної $y(t)$:

$$U_y = \frac{\int_T \pi_y(\theta) \log[\pi_y(\theta)\varepsilon_t] d\theta}{\int_T \pi_y(\theta) d\theta}, \quad (8)$$

де $\theta=t/T$ — відносний час; T — інтервал часу спостереження змінної $y(t)$; ε_t — поріг розрізняваності часу. Як поріг розрізняваності може бути використаний інтервал дискретизації сигналу $y(t)$. Вираз (8) є аналогом ентропії Шенона.

Як аналог невизначеності Бонгарда можна

використовувати наступну формулу

$$U_B = - \frac{\int_T \pi_y(\theta) \log [\pi_y(\theta) \varepsilon_t] d\theta}{\int_T \pi_x(\theta) d\theta}. \quad (9)$$

Для оцінювання дезінформації, що вноситься моделлю, використовуємо вираз:

$$D = U_B - U_y = \frac{\int_T \pi_x(\theta) \log \frac{\pi_x(\theta)}{\pi_y(\theta)} d\theta}{\int_T \pi_x(\theta) d\theta}. \quad (10)$$

У разі ідеальної моделі сигнал $\ddot{y}(t)$ точно відстежує зміни $y(t)$, тобто виконується умова $\pi_y(t) = \pi_{\ddot{y}}(t)$. При цьому кількість дезінформації дорівнює нулю. Чим нижче адекватність моделі, тим більше значення величини D , розраховане відповідно до (10).

Для практичних розрахунків зручно використовувати дискретну форму виразу (10):

$$D = \frac{\sum_i \pi_{y_i} \log \frac{\pi_{y_i}}{\pi_{\ddot{y}_i}}}{\sum_i \pi_{y_i}}, \quad (11)$$

де π_{y_i} і $\pi_{\ddot{y}_i}$ — значення інтенсивності зміни вихідних величин об'єкта і моделі, визначені для моменту часу θ_i .

Проектування графічного інтерфейсу користувача

У середовищі MATLAB створений Graphical User Interface (GUI), який реалізує поставлену задачу. Вигляд GUI показаний на рис. 1.

Для підвищення точності дослідження проводяться кілька експериментальних досліджень динамічного об'єкта. Результати досліджень заносяться у текстовий файл. Кожен рядок файлу містить відлік часу і ряд значень регульованої величини, отриманих при різних значеннях вхідних тестових сигналів. Всі числа у рядку розділяються комами. У першому рядку додатково указуються значення вхідних сигналів.

По натисненні кнопки «Ввести» з текстового файлу, ім'я якого вказане у відповідному полі, вводяться дані досліджень об'єкта. У поле для графіку «Крива розгону» виводяться стільки кривих, скільки досліджень проведено. Натисненням кнопки «Усереднення» здійснюється усереднення даних усіх досліджень. За допомогою кнопки «Нормалізація» усереднений графік переноситься у початок координат і нормується діленням на коефіцієнт передачі об'єкта. Далі можна виконати апроксимацію кривої розгону передатною функцією (ПФ) першого, другого, третього або четвертого порядку натисканням

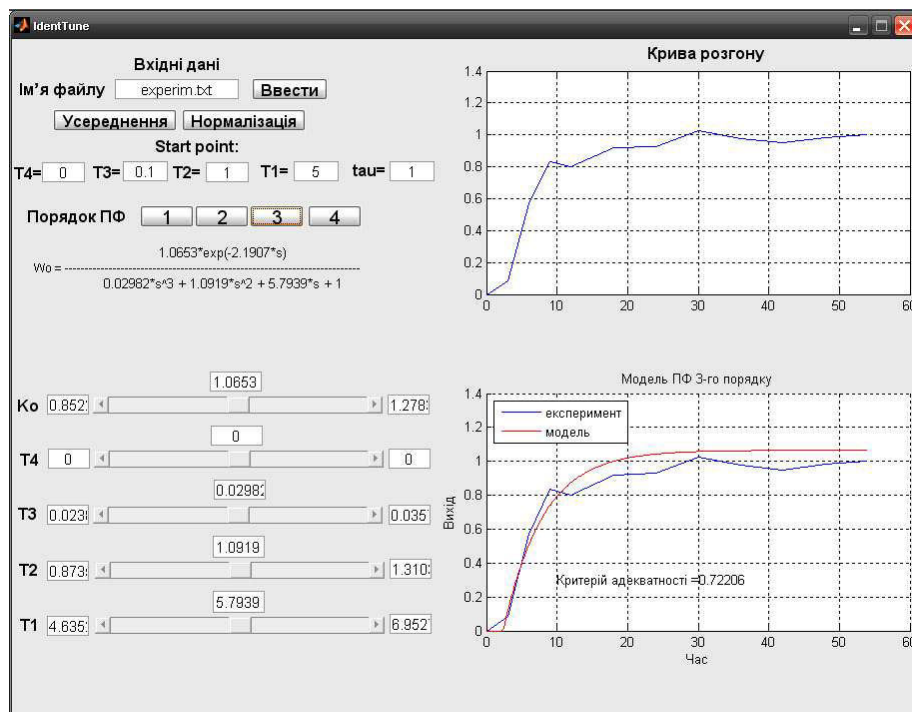


Рис. 1. Графічний інтерфейс користувача

на відповідну кнопку, позначену цифрою 1, 2, 3 або 4.

Апроксимація здійснюється використанням функції мінімізації з обмеженнями `fmincon`. Для прикладу, апроксимація ПФ третього порядку здійснюється командою наведеною на рис. 2.

```
fmincon("err3",[T3,T2,T1,tau],[[],[],[],[],lb,ub,[],options])
```

Рис. 2. Програмний код «Команда апроксимації»

Мінімізується цільова функція `err3` (рис. 3).

```
function error = err3(x)
% Помилка апроксимації для ПФ 3-го порядку
global t temp K Wo t1 temp1
Wo=tf(K,[x(1),x(2),x(3),1]); Wo.InputDelay=x(4);
temp1=temp;
for i=2:length(t)
    y= step(Wo,t(i));
    temp1(i)= y(length(y));
end
error=sum((temp-temp1).^2);
end
```

Рис. 3. Програмний код «Апроксимація»

Успіх розв'язання задачі мінімізації залежить від вдалого вибору початкових значень шуканих параметрів. Ці значення треба попередньо ввести у відповідні поля під заголовком «Start point».

Розрахунок інформаційного критерію адекватності (11) виконується за допомогою команд (рис. 4).

```
pio=abs(diff(temp));% інтенсивність зміни об'єкта
temp3=temp;
temp3(1)=0;
for i=2:length(t)
    y=step(Wo,t(i));
    temp3(i)= y(length(y));
end
pim=abs(diff(temp3)); % інтенсивність зміни моделі
% Обчислюється інформаційний критерій
A=sum(pio.*log2(pio./pim)); % чисельник
B=sum(pio); % знаменник
adeq=A/B
```

Рис. 4. Програмний код «Розрахунок інформаційного критерію адекватності»

Результатами розрахунку є параметри передатної функції K_o (коефіцієнт передачі), T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , які виводяться над повзунками відпо-

відних слайдерів. Пересуванням слайдерів можна коректувати модель, домагаючись бажаного виду кривої відгуку і контролюючи значення критерію адекватності.

Результуюча передатна функція виводиться для наочності також і у символьному вигляді (рисунки).

Висновки

Розроблений інструментальний комп'ютерний засіб автоматизації розв'язування задач ідентифікації динамічних об'єктів управління з використанням інформаційного критерію адекватності. Використання цього засобу забезпечує побудову високоточних моделей з мінімальними витратами часу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Concepts of Model Verification and Validation* / Thacker B.H., Doebling S.W., Hemez F.M. et al. – Los Alamos: LANL, 2004. – 41 p.
2. Райбман Н.С. Идентификация объектов управления // Автоматика и телемеханика. – 1979. – Вып. 6. – С.80-93.
3. Бортник Г.Г., Васильківський М.В., Бортник О.Г. Автоматизована система оцінювання динамічних параметрів аналого-цифрових перетворювачів // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2016. – № 2. – С.85-89.
4. 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.
5. Бильфельд Н.В. Идентификация объектов управления в Toolbox PID Tuner // Новый университет: серия «Технические науки». – 2016. – № 6-7. – С.52-53.
6. Трунов О.М. Критерий адекватности как оценка эффективности процесса построения модели // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 1/4 (73). – С.36-41.
7. Yang J., Yang J.Y., Zhang D. What's wrong with Fisher criterion? // Pattern Recognition. – 2002. – V. 35 (11). – pp.2665-2668.
8. Мальцев Н.Н., Манко Г.И. Информационная оценка адекватности математических описаний технологических процессов // Вопросы химии и химической технологии. – Харьков : Вища школа, 1977. – Вып. 47. – С.140-143.
9. Бонгард М.М. Проблемы узнавания. – М.: Наука, 1967. – 320 с.
10. Информационная оценка точности моделирования химико-технологических процессов / В.В. Кафаров, Г.И. Манко, В.П. Мешалкин, В.И. Пинский // Автоматика и телемеханика. – 1980. – № 1. – С.170-182.

Надійшла до редакції 25.09.2017

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ**Петренко Е.Н., Манко Г.И.**

В данной работе рассмотрены вопросы автоматизации процесса идентификации динамических объектов. Исследовано использование компьютерных технологий для обеспечения автоматизации процессов идентификации объектов управления. Выполнен анализ существующих методов оценки адекватности моделей, получаемых в ходе идентификации, отмечены ограничения применения этих методов. Обосновано использование информационного подхода при решении задач оценивания адекватности математических моделей. Предложено использование универсальной, применимой при любом методе идентификации информационной оценки адекватности на основе понятия полезной информации Бонгарда. Приведены формулы, удобные для практического использования при сравнительной оценке точности моделей объектов управления различного типа. Описан процесс проектирования графического интерфейса пользователя — Graphical User Interface (GUI) в специализированной среде GUIDE системы MATLAB. Спроектированный GUI позволяет в интерактивном режиме с максимальной степенью автоматизации выполнять идентификацию динамических объектов. При этом создание модели и оценка ее адекватности проводятся с использованием разных методов. Разработанные сценарии и функции GUI вводят данные экспериментальных исследований динамического объекта, усредняют, нормализуют и выполняют их аппроксимацию передаточной функцией первого, второго, третьего или четвертого порядка, выполняют построение графиков кривых разгона объекта и кривой отклика модели. Аппроксимация осуществляется с использованием функции минимизации с ограничениями *fmincon*. Приведены фрагменты функций, осуществляющих аппроксимацию кривой разгона объекта и расчет значений информационного критерия адекватности. Передвижением слайдеров GUI можно корректировать модель, добиваясь желательного вида кривой отклика и контролируя при этом значение критерия адекватности. Использование GUI обеспечивает построение высокоточных моделей динамических объектов управления с минимальными затратами времени. Использование информационного критерия адекватности позволяет выбрать наиболее адекватную модель.

Ключевые слова: графический интерфейс, идентификация, адекватность, компьютерные технологии, кривая разгона, передаточная функция.

AUTOMATION OF THE CONTROL OBJECTS IDENTIFICATION PROCESS**Petrenko E.N., Manko G.I.****Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine**

The issues of automation of the dynamic objects identification process are reviewed in the paper. The use of computer technologies with the purpose of the automated identification is investigated. The analysis of existent methods of adequacy estimation for models obtained during authentication is executed and the limitations of application of these methods are noted. The application of informational approach to the mathematical models adequacy estimation is substantiated. The use of the universal adequacy informational estimate, applicable for any method of the identification, is suggested. This estimate is based on the concept of Bongard's useful information. The handy for the practical using formulas are cited for the comparative accuracy estimation of the control object models of different type. The process of design of the Graphical User Interface (GUI) in the special-purpose environment GUIDE of

MATLAB system is described. The designed GUI allows to execute authentication of dynamic objects in the interactive mode with the maximal degree of automation. At the same time the creation of model and estimation of its adequacy are performed with the use of different methods. The GUI's scripts and functions input the data of the dynamic object experimental researches, average, normalize and approximate it by the first, second, third or fourth order transfer function. Fragments of functions realizing the control object step response approximation and the calculation of the adequacy informational criterion values are shown. The approximation is carried out using the function *fmincon* for minimization with constraints. It is possible to correct a model by the movement of GUI's sliders with the monitoring of the desirable type of response curve and the controlling of the adequacy criterion value. The use of GUI provides the creation of high-precision models with the minimum time charges. Using the adequacy informational criterion allows to choose the most appropriate model.

Keywords: GUI, verification and validation, computer technology, step response, transfer function.

REFERENCES

1. Thacker B.H., Doebbling S.W., Hemez F.M. *Concepts of Model Verification and Validation*. LANL, Los Alamos, 2004, 41 p.
2. Rajbman N.S. Identifikatsiya ob'ektov upravleniya [Identification of the control objects]. *Avtomatika i telemekhanika*, 1979, vol. 6, pp. 80-93. (in Russian).
3. Bortnyk G.G., Vasylykivskiy M.V., Bortnyk O.G. Avtomatyzovana systema otsiniuvannia dynamichnykh parametriv analogo-tsifrovyykh peretvoriuvachiv [Automated system for evaluating the dynamic parameters of analog-digital converters]. *Vymiruvalna ta obchysluvalna tehnika v tekhnolohichnykh protsesakh*, 2016, no. 2, pp. 85-89. (in Ukrainian).
4. Strizhnev A.G., Markov A.V., Rusakovich A.N. Identifikatsiya ob'ekta upravleniya po perehodnoy karakteristike zamknytoy sistemy [Identification of the control object by the transient characteristic of a closed system]. *Doklady BGUIR*, 2012, vol. 67, no. 5, pp. 65-72. (in Russian).
5. Bilfeld N.V. Identifikatsiya ob'ektov upravleniya v Toolbox PID Tuner [Identification of the control objects in the Toolbox PID Tuner]. *Novyy universitet: seriya «Tekhnicheskie nauki»*, 2016, no. 6-7, pp. 52-53. (in Russian).
6. Trunov O.M. Kriterii adekvatnosti yak otsinka efektyvnosti protsesu pobudovy modeli [The criterion of adequacy as an assessment of the effectiveness of the process of constructing a model]. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*, 2015, vol. 73, no. 1/4, pp. 36-41. (in Ukrainian).
7. Yang J., Yang J.Y., Zhang D. What's wrong with Fisher criterion? *Pattern Recognition*, 2002, vol. 35, no. 11, pp. 2665-2668.
8. Maltcev N.N., Manko G.I. Informatsionnaya otsenka adekvatnosti matematicheskikh opisaniy tekhnologicheskikh protsessov [Information assessment of the adequacy of mathematical descriptions of technological processes]. *Voprosy himii i himicheskoy tekhnologii*, Vischa shkola, Harkov, 1977, vol. 47, pp. 140-143. (in Russian).
9. Bongard, M.M. Problemy uznnavannya [Problems of recognition]. Nauka, Moscow, 1967, 320 p. (in Russian).
10. Kafarov V.V., Manko G.I., Meshalkin V.P., Pinskiy V.I. Informatsionnaya otsenka tochnosti modelirovaniya himiko-tekhnologicheskikh protsessov [Information assessment of the accuracy of modeling of chemical-technological processes]. *Avtomatika i telemekhanika*, 1980, no. 1, pp. 170-182. (in Russian).

УДК 621.771.06.669.721

Рахманов С.Р.^а, Гармашев Д.Ю.^б, Степаненко А.Н.^в, Донец Д.А.^г

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССА ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

^а Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина^б ООО «ИНТЕРПАЙП Украина», г. Днепр, Украина^в Государственное предприятие «УкрГИПРОМЕЗ», г. Днепр, Украина^г ООО «ИНТЕРПАЙП Нико Тьюб», г. Никополь, Украина

В данной работе приведены результаты исследования процесса винтовой прокатки труб с использованием деформационно-геометрической модели на основе блочных алгоритмов. Алгоритмы математической модели в виде блочной структуры позволяют вводить новые или заменять действовавшие блоки, учитывая влияние того или иного фактора на процесс прокатки труб (например, углы подачи и раскатки). Моделирование и исследование формы очага деформации при прошивке сплошной и раскатке полой заготовки проведено с учетом формы и параметров рабочих инструментов, применяемых на стане-элонгаторе, формы и величины площади контактной поверхности деформируемого металла и валков, режимов настройки базового оборудования стана в условиях работы промышленного трубопрокатного агрегата (ТПА) 5-12". В работе предложен в качестве базовой САПР графический метод, основанный на одновременном твердотельном моделировании в средах Компас-3D, Autodesk Inventor, SolidWorks, ANSYS или DEFORM-3D. Предложенные методы, учитывая простоту и высокую точность построений, позволяют проводить исследования основных параметров процесса визуализировано и эффективно, что обуславливает получение необходимых данных. Кроме того, данные продукты содержат развитые средства создания пользовательских библиотек на всех основных языках программирования. Проведена оценка точности расчета энергосиловых параметров процесса, геометрических параметров гильз и колебаний их значений при моделировании и в производственном эксперименте. Моделирование процесса прокатки позволило объяснить влияние технологических параметров процесса прокатки на качество и точность получаемых гильз и разработать методику определения точных параметров процесса и рациональной калибровки инструмента. Моделирование процесса прокатки дают возможность производить анализ процесса и разрабатывать корректирующие воздействия.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, конечные элементы, прошивные станы, трубы.

Введение

В условиях жесткой конкуренции современного рынка перед технологическими службами предприятий встают определенные задачи в сжатые сроки проведения анализа технологического процесса и рабочего инструмента сложной формы при жестких допусках на размеры конечного изделия с целью снижения его себестоимости.

Постановка задачи

Одним из основных факторов, определяю-

щим адекватность моделирования винтовой прокатки, является способ описания геометрических параметров очага деформации и процесса формоизменения металла. Из-за сложности процесса винтовой прокатки (прошивки) заготовки в валках, повернутых на углы подачи и раскатки, с использованием оправки и направляющего инструмента не всегда удастся провести исследование влияния разных факторов (сортментных, настроечных, калибровки инструмента и др.) на итоговые параметры (качество гильз,

количество дефектов, проработку структуры обрабатываемого изделия и др.) (рис. 1).

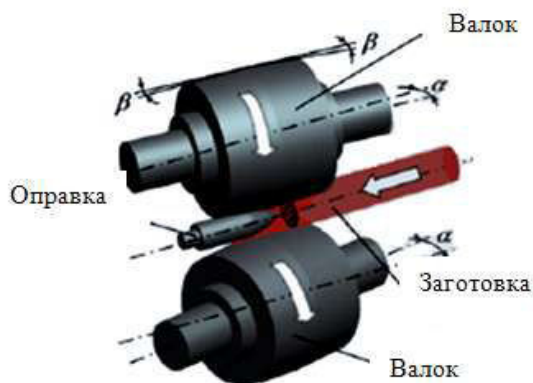


Рис. 1. Очаг деформации при винтовой прокатке труб (сечение по валку и линейке)

Это обусловлено не всегда возможной быстрой перенастройкой стана или замены инструмента. Не удастся надолго остановить работающий стан по экономическим соображениям. В такой ситуации требуется тщательный подход к планированию серии экспериментов и последующей обработке полученных данных. При проведении натурного эксперимента на действующем оборудовании, как правило, в полной мере не учитывается фактическая калибровка инструмента. Если стан останавливается на короткое время, например для планового ремонта, то на нем попутно проводят эксперимент, при этом, например, фактический износ рабочей поверхности инструмента часто не учитывается, что также влияет на результаты анализа.

Анализ последних исследований

Для нахождения параметров настройки прошивного стана необходимо точно описать геометрические характеристики очага деформации в любом поперечном сечении. Данная задача легко решается без учета разворота валков на угол подачи [1] и применительно для работы прошивных станов на небольших углах подачи (до 6°) и в составе малых ТПА [2].

Существует достаточно много работ по определению геометрических параметров очага деформации при прошивке [2–9], но существующие математические модели по геометрическим зависимостям очага деформации при точной постановке задачи приводят к сложным громоздким выражениям и уравнениям 4-го порядка, решение которых достигается различными

итерационными способами, или вводятся допущения, способствующие снижению точности расчета. В результате создания CAD-программ, например, КОМПАС-3D и SolidWorks, основные геометрические зависимости в очаге деформации находятся при помощи твердотельного моделирования, основанного на поверхностном моделировании с граничным представлением твердых тел. Данный подход является наиболее точным, но для его реализации необходимы навыки работы в CAD-программах.

Решение задачи

На ряде опытных предприятий институтов и заводов используются полупромышленные лабораторные станы, на которых можно проводить широкие исследования, но они по своей сути трудоемки [7–9] и сопряжены с необходимостью учета масштабного фактора при разработке рекомендаций для промышленных станов.

В данной работе приведены результаты исследования процесса винтовой прокатки труб с использованием деформационно-геометрической модели на основе блочных алгоритмов. Алгоритмы математической модели в виде блочной структуры позволяют вводить новые или заменять действовавшие блоки, учитывая влияние того или иного фактора на процесс прокатки труб (например, углы подачи и раскатки). Моделирование и исследование формы очага деформации при прошивке сплошной и раскатке полой заготовки проведено с учетом формы и параметров рабочих инструментов, применяемых на стане-элонгаторе, формы и величины площади контактной поверхности деформируемого металла и валков, режимов настройки базового оборудования стана в условиях работы промышленного ТПА 5-12".

В работе предложен в качестве базовой САПР графический метод, основанный на одновременном твердотельном моделировании в средах Компас-3D, Autodesk Inventor, SolidWorks, ANSYS или DEFORM-3D. Предложенные методы, учитывая простоту и высокую точность построений, позволяет проводить исследования основных параметров процесса визуализировано и эффективно, что обуславливает получение необходимых данных. Кроме того, данные продукты содержат развитые средства создания пользовательских библиотек на всех основных языках программирования [7].

В настоящей модели (САПР) реализованы задачи моделирования для случаев прошивки и раскатки на основе метода конечных элементов. Планируется также разработка общего мо-

дуля трехмерного моделирования пластических деформаций. Объединение в единое целое средств трехмерного геометрического моделирования, разработки технологии и исследования процесса косошальной прокатки позволяет выйти на решение задачи оптимизации технологии путем подбора условий наиболее соответствующего конечному изделию, виду прокатного оборудования и параметров технологического процесса.

Общая структура комплекса программных средств автоматизированной разработки технологии горячей винтовой прокатки приобретает вид, приведенный на рис. 2. Здесь для объединения средств автоматизации используется графический интерфейс, запускаемый как библиотека, зарегистрированная в САПР – КОМПАС-3D. Он позволяет создавать проекты процесса прошивки трубной заготовки и раскатки труб. Исходными данными являются трехмерные модели инструмента и очага деформации, создаваемые пользователем тоже КОМПАС-3D или Autodesk Inventor, SolidWorks и, импортируемые в технологическую подсистему напрямую или же из созданных файлов. Для ускорения процесса построения модели может использоваться библиотека, в которой в параметрическом виде хранятся часто встречающиеся элементы инструмента (стержни, оправки, валки и др.) разных типов.

Проектирование технологического инструмента и формы деформируемого тела осуществ-

ляют в пакете программы КОМПАС-3D на основании расчетных исходных данных.

Моделирование пластической деформации трубной заготовки в процессах прошивки и раскатки в косошальном стане-элонгаторе проводятся в программах ANSYS или DEFORM-3D. Процесс моделирования осуществляется по следующей схеме.

Геометрические параметры очага деформации определяются в зависимости от положения оси вала относительно оси заготовки, калибровки валков и линеек, а также размеров заготовки и гильзы. Исходными данными для расчета служат рассчитываемые параметры программы автоматического расчета режимов прокатки (таблицы прокатки) ТПА с пилигримовыми станами (рис. 3), которые выполняются в Microsoft Excel [7-9]. Результаты расчета заносятся в таблицу исходного файла интегрированного в Microsoft Excel.

Отображенные в таблице параметры расчета являются базовыми для построения (визуализации) очага деформации стана-элонгатора. Расчетная параметризация «конструкций» инструментов очага из 3D-геометрических прототипов реализована с помощью языка Visual Basic 6.0 (встроенного в Microsoft Excel, рис. 4), позволяющего осуществлять программную интеграцию с системами Autodesk Inventor, SolidWorks и КОМПАС-3D (рис. 5 и рис. 6).

Далее создается конечно-элементная (КЭ) модель в 3D-виде (рис. 5 и 6) с помощью про-

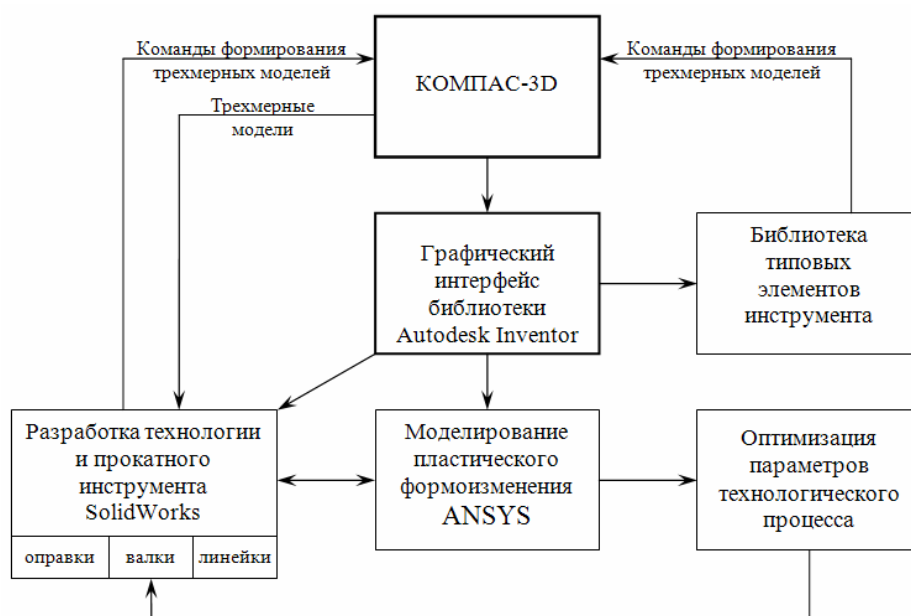


Рис. 2. Структура САПР технологии горячей винтовой прокатки труб

20	ТАБЛИЦА ПРОКАТКИ																							
21	горячекатаных труб на трубопрокатном агрегате 6-16".																							
22																								
23	Размер труб по стандарту, мм			Масса 1 п.м., кг	Отношение C ₀ /D _н	Допускаемые отклонения по стандарту (ТУ)																		
24	Диаметр наруж., мм	Диаметр внутр., мм	Толщина стенки, мм			Диаметр наруж., мм		Диаметр внутр., мм		Толщина стенки, мм		Длина, м		Масса 1 п.м., кг		Диаметр наруж. расч., мм	Диаметр внутр., мм	Толщина стенки, мм	Откл. по толщине стенки, мм		Количество кратов, шт	Количество труб после разрезки шпиги	Длина без число концов	
25						от	до	от	до	от	до	от	до	от	до				от	до				от
26	D _н	D _{вн}	C ₀	G ₀ mm	C ₀ /D _н	D _н от	D _н до	D _{вн} от	D _{вн} до	C ₀ от	C ₀ до	L _{от}	L _{до}	G ₀ mm _т	G ₀ mm _{до}	D _{нр}	D _{внр}	C _р	C _р от	C _р до	K _р			
27				35,1		-0,505111	0,998336			-12,5279642	183,906							9,1						
28	168,3	150,4	8,9	35,1	0,053	167,4	170,0	0,0	0,0	7,8	25,6	0,0	12,0	0,0	0,0	169,3	153,5	7,9	7,9	25,5	3	3	13,00	
29																								
30		3		5	6																			
31		3		4	9		5	6			7	8					10		11					
32	Координаты точки A, мм			Координаты точки B, мм		Координаты точки C, мм		Координаты точки D, мм		tgφ ₁	tgφ ₂	Координаты точки O ₁ , мм		Координаты точки E, мм		Координаты точки O ₂ , мм		tgφ ₂	tgγ	r ₁ , мм	α ₆₀ , град	Координаты точки F ₆₀ , мм		Координаты точки F
33	X _A	Y _A	X _B	Y _B	X _C	Y _C	X _D	Y _D				X _{O1}	Y _{O1}	X _E	Y _E	X _{O2}	Y _{O2}					X _{F60}	Y _{F60}	X _F ^{1/60}
34	X _A	Y _A	X _B	Y _B	X _C	Y _C	X _D	Y _D				X _{O1}	Y _{O1}	X _E	Y _E	X _{O2}	Y _{O2}					X _{F60}	Y _{F60}	X _F ^{1/60}
35	X _A	Y _A	X _B	Y _B	X _C	Y _C	X _D	Y _D	tgφ ₁	tgφ ₂		X _{O1}	Y _{O1}	X _E	Y _E	X _{O2}	Y _{O2}	tgφ ₂	tgγ	r ₁	α ₆₀	X _{F60}	Y _{F60}	X _F ^{1/60}
36	-25,36	289,89	165,48	236,33	215,00	0,00	70,06	263,11	-0,2807	-11,4301	-0,90	10,31	190,24	118,16	58,11	90,47	-4,7720	1,3584	280,65	75	75,32	281,08	75	
37																								
38																								

Рис. 3. Программа автоматического расчета режимов прокатки (таблица прокатки) – блок расчета координат пространственного положения элементов очага деформации стана-элонгатора

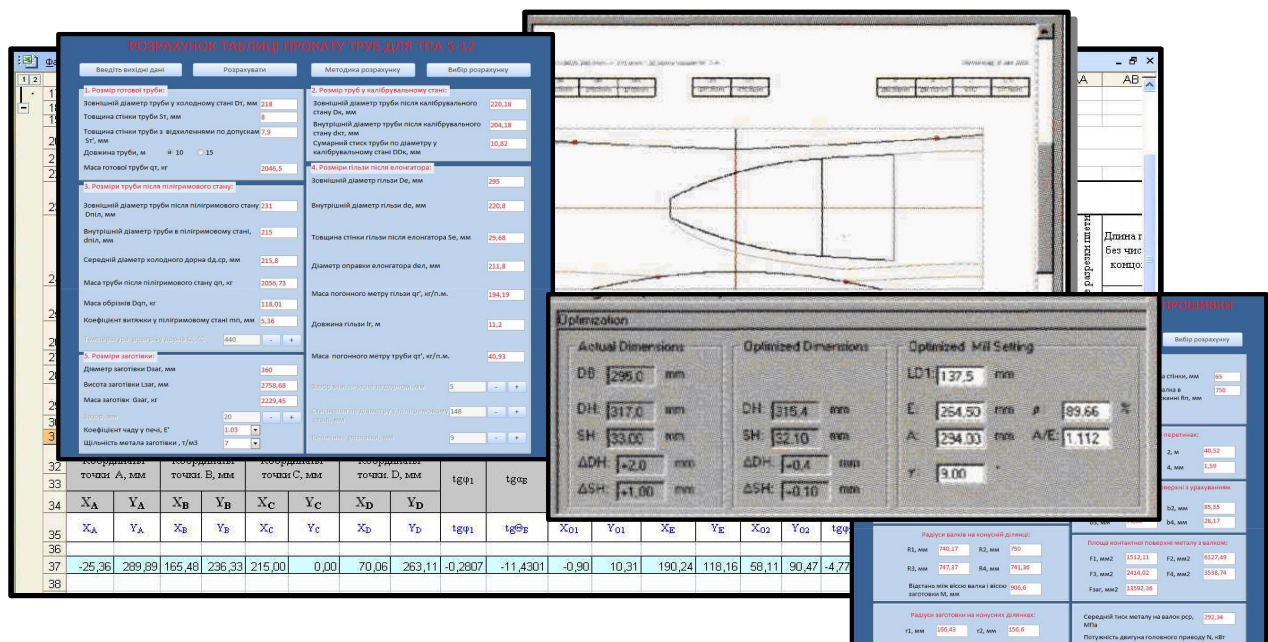


Рис. 4. Программа параметризации «конструкций» инструментов очага деформации стана-элонгатора

граммы твердотельного моделирования (КОМПАС-3D). После построения (изменения параметров) очага деформации стана-элонгатора в автоматическом режиме отображаются ранее рассчитанные узловые точки процесса. Параметры точек далее заносятся в геометрическую мо-

дель расчета формы очага деформации и поверхности контакта металла с технологическими инструментами. Полученные в результате реализации модели параметры в виде уравнений поверхностей отображаются в объемном виде с помощью программы КОМПАС-3D и далее пе-

редаются в Autodesk Inventor.

Геометрические характеристики очага деформации могут в дальнейшем в автоматическом режиме переноситься и в программу SolidWorks, где осуществляется нанесение конечно-элементной сетки с использованием собственного препроцессора LS-PREPOST или любого другого подходящего препроцессора. Там же определяются силовые параметры, наносятся ограничения и т.п.

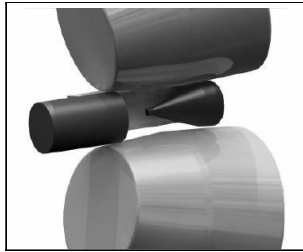


Рис. 5. Трехмерная модель процесса прошивки

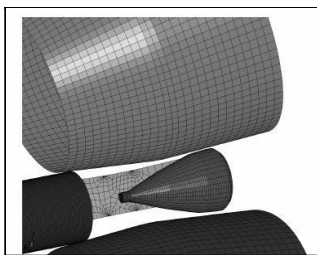


Рис. 6. КЭ модель процесса прошивки

После чего осуществляется решение в решателе среды ANSYS или DEFORM-3D.

Следующим, заключительным, этапом является анализ выполненного решения (постпро-

цессорная обработка материалов).

После анализа проведенного моделирования технологи могут откорректировать технологический процесс, а конструкторы рассчитанную оснастку. Результаты расчета передаются в виде иллюстраций (рис. 7) и в форме таблицы формата Microsoft Excel (рис. 8).

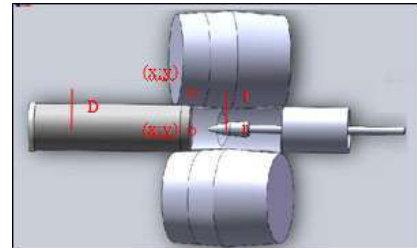


Рис. 7. Визуализация схемы прокатки, полученная по разработанной программе и САПР КОМПАС-3D

Данные полученного файла в автоматическом режиме передаются в соответствующий файл САПР Autodesk Inventor, где на основании введенных данных создается трехмерная параметрическая модель очага деформации, инструмента рассчитанного профиля (рис. 6) и осуществляется «отработка» очага (прокрутка, приведение в действие всех элементов).

Параметрическая модель формируется на основе эскиза, созданного в плоскости, параллельной вертикальной плоскости и смещенной относительно этой плоскости на величину угла смещения осей валков относительно оси прокатки. Графическое исследование сечений такой модели на двухмерном чертеже позволяет легко определить диаметр прокатываемой заго-

5	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ								
6	Таблица прокатки мерных труб в ТПЦ-4 по стандартам API и ГОСТ Р53366 из непрерывной заготовки.																																						
8	ПИЛИРИМОВЫЙ СТАН															ЭЛОНГАТОР										ПРОШИВНОЙ ПРЕСС					ЗАГОТОВКА В ХОЛОД СОС								
9																																							
10	кт. <td rowspan="4">Диа-метр калибра, мм</td> <td rowspan="4">Диа-метр дорна, мм</td> <td colspan="4" rowspan="4">Наружный диаметр трубы, мм</td> <td colspan="4" rowspan="4">Толщина стенки трубы, мм</td> <td rowspan="4">Масса т.п. трубы, кг/м</td> <td rowspan="4">Масса плети, кг</td> <td rowspan="4">Полез-ная длина плети, м</td> <td rowspan="4">Коеф. вытяж-ки</td> <td rowspan="4">Нар. диаметр гильзы, мм</td> <td rowspan="4">Диам. оправки, мм</td> <td rowspan="4">Толщ и-на стенок и гильзы, мм</td> <td rowspan="4">Масса т.п. гильзы, кг/м</td> <td rowspan="4">Масса гильзы, кг</td> <td rowspan="4">Дли-на гильзы, мм</td> <td rowspan="4">Коеф. вытяж-ки</td> <td rowspan="4">Диам-етр матрицы у опоры и пуанс. мм</td> <td rowspan="4">Вн. диаметр станка (Длр) мм</td> <td rowspan="4">Длина стака-на, мм</td> <td rowspan="4">Толщ и-на дорна стака-на, мм</td> <td rowspan="4">Коеф. вытяж-ки</td> <td rowspan="4">Наруж-ный диаметр заготовки, мм</td> <td rowspan="4">Высо-та заго-товки, мм</td> <td rowspan="4">Масса заго-товки, кг/м</td> <td rowspan="4">Мас-са т.п. заго-товки, кг/м</td>	Диа-метр калибра, мм	Диа-метр дорна, мм	Наружный диаметр трубы, мм				Толщина стенки трубы, мм				Масса т.п. трубы, кг/м	Масса плети, кг	Полез-ная длина плети, м	Коеф. вытяж-ки	Нар. диаметр гильзы, мм	Диам. оправки, мм	Толщ и-на стенок и гильзы, мм	Масса т.п. гильзы, кг/м	Масса гильзы, кг	Дли-на гильзы, мм	Коеф. вытяж-ки	Диам-етр матрицы у опоры и пуанс. мм	Вн. диаметр станка (Длр) мм	Длина стака-на, мм	Толщ и-на дорна стака-на, мм	Коеф. вытяж-ки	Наруж-ный диаметр заготовки, мм	Высо-та заго-товки, мм	Масса заго-товки, кг/м	Мас-са т.п. заго-товки, кг/м								
11																																катать		овальность		катать		разностен.	
12																																от		до		от		до	
13																																и, мм		и, мм		и, мм		и, мм	
14																																							
15																																							
16	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46										
17	7.3	178.0	163	/ 4	177.0	175.5	178.0	6.6	5.7	7.2	26.7	979	36.7	12.0	290	165	58.5	321	1068	3327	2.40	393	160	1386	120	1.13	385	1210	1101	910									
18	8.2	178.0	160	/ 1	175.5	174.5	177.0	7.3	6.4	8.1	29.2	1071	36.7	11.0	290	165	58.5	321	1161	3617	2.41	393	160	1503	120	1.13	385	1315	1197	910									
19	9.1	178.0	160	/ 1	177.0	175.5	178.0	8.1	7.1	9.0	32.6	1182	36.3	10.9	300	165	63.5	356	1280	3595	2.18	393	160	1653	120	1.13	385	1450	1320	910									
20	10.0	178.0	157	/ 8	176.0	175.0	177.5	9.0	7.8	9.9	35.8	1303	36.4	11.2	310	160	71.0	402	1412	3513	1.93	393	160	1818	120	1.12	385	1600	1456	910									
21	10.9	178.0	158	/ 9	177.5	176.0	178.5	9.7	8.5	10.8	38.7	1404	36.3	10.9	315	160	73.5	421	1518	3606	1.86	393	160	1946	120	1.12	385	1720	1565	910									
22	12.5	178.0	154	/ 5	177.0	176.0	178.5	11.1	9.9	12.4	43.4	1581	36.4	9.7	315	160	73.5	421	1695	4026	1.86	393	160	2165	120	1.12	385	1920	1747	910									
23	14.2	178.0	150	/ 1	176.5	175.5	178.0	12.7	11.3	14.1	49.5	1800	36.4	9.2	320	153	81	457	1916	4193	1.92	393	160	2165	120	1.12	385	2170	1975	910									
24	15.9	178.0	148	/ 9	177.0	176.0	178.5	14.1	12.6	15.7	54.7	1329	24.3	7.0	300	150	69.5	380	1434	3775	2.30	393	160	2165	120	1.12	385	1625	1479	910									
25	17.7	178.0	145	/ 6	177.5	176.0	178.5	15.7	14.1	17.5	60.4	1462	24.2	6.4	300	150	71.0	386	1567	4059	2.27	393	160	2165	120	1.12	385	1775	1615	910									
26	20.2	178.0	138	/ 9	175.5	174.5	177.0	18.2	16.2	20.0	68.1	1651	24.3	6.5	310	140	81.5	442	1765	3994	1.98	393	160	2165	120	1.12	385	2000	1820	910									
27	21.1	178.0	139	/ 10	177.0	176.0	178.0	18.9	17.0	20.9	71.1	1714	24.2	6.2	310	140	81.5	442	1827	4134	1.98	393	160	2165	120	1.12	385	2070	1884	910									
28	24.0	178.0	131	/ 2	175.5	174.5	176.5	21.7	19.6	23.8	79.4	1925	24.3	5.7	310	135	84	450	1925	4278	1.94	393	160	2165	120	1.12	385	2180	1984	910									
29	24.3	178.0	132	/ 3	176.0	175.0	177.0	22.0	19.8	24.1	80.6	1942	24.2	5.8	315	135	86.5	469	1942	4140	1.86	393	160	2165	120	1.12	385	2200	2002	910									
31	8.7	178.0	160	/ 1	176.0	175.0	177.5	7.6	6.6	8.6	30.4	1098	36.1	10.6	290	165	58.5	321	1187	3698	2.41	393	160	1537	120	1.13	385	1345	1224	910									
32	10.3	178.0	157	/ 8	176.0	175.0	177.5	9.1	8.0	10.2	36.1	1302	36.1	10.1	300	160	66.0	366	1404	3836	2.12	393	160	1807	120	1.13	385	1590	1447	910									
33	12.2	178.0	154	/ 5	176.5	175.5	178.0	10.8	9.5	12.1	42.6	1532	36.0	9.4	310	160	71.0	402	1642	4084	1.95	393	160	2111	120	1.12	385	1860	1693	910									
34	13.6	178.0	150	/ 1	175.5	174.5	177.0	12.1	10.7	13.5	47.1	1694	36.0	8.8	315	155	76.0	431	1810	4199	2.03	393	160	2111	120	1.12	385	2050	1866	910									
36	7.1	187.0	171	/ 2	184.5	183.5	186.0	6.2	5.3	7.0	26.3	958	36.4	12.7	300	175	58.0	333	1050	3153	2.32	393	160	1364	120	1.13	385	1190	1083	910									
37	8.2	187.0	171	/ 2	186.0	185.0	187.5	7.2	6.2	8.1	30.6	1106	36.1	10.9	300	175	58.0	333	1200	3604	2.32	393	160	1554	120	1.13	385	1360	1238	910									
38	9.5	187.0	167	/ 8	184.5	183.5	186.0	8.3	7.2	9.4	34.8	1262	36.3	9.9	300	170	60.5	344	1359	3951	2.26	393	160	1752	120	1.13	385	1540	1401	910									
39	10.7	187.0	168	/ 9	186.5	185.5	187.5	9.4	8.2	10.6	39.6	1421	35.9	9.6	310	170	65.5	380	1527	4019	2.05	393	160	1960	120	1.12	385	1730	1574	910									
40	11.8	187.0	163	/ 4	185.0	184.0	186.5	10.5	9.3	11.7	43.6	1578	36.1	9.9	320	165	73.5	430	1695	3942	1.82	393	160	2165	120	1.12	385	1920	1747	910									
41	Н	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д	Д									
42	н	д	д	д	д	д	д	д	д	д	д	д	д	д	д	д	д	д	д	д	д	д	д	д	д	д	д	д	д	д									
43	к	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л									
44	к	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л									
45	к	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л									
46	к	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л	л									

Рис. 8. Результаты расчета параметров прокатки на ТПА 5-12"

товки D в зависимости от координаты его сечения x и y, величину зазора g между валками в рассматриваемом сечении путем прямого измерения.

Нетрудно убедиться в том, что предлагаемая методика универсальна и может успешно использоваться для анализа различных процессов винтовой прокатки. На рис. 8 приведены результаты визуализации расчета процесса винтовой прошивки заготовки.

Проведенные исследования показали удовлетворительную сходимость результатов, полученных по данной модели с результатами, полученными на практике и проверенными по другим методикам, разработанными ранее [1–9].

Выводы

Полученные результаты моделирования соответствуют основным положениям теории обработки металлов давлением.

Моделирование процесса прокатки (прошивки) позволило объяснить характер изменения напряженно-деформированного состояния металла при винтовой прокатке, оценить влияние технологических параметров процесса (угол подачи, угол раскатки, овалация, калибровка инструмента и т.п.) на качество и точность получаемых гильз.

На основе пошагового моделирования процесса прошивки разработана методика по определению настроечных параметров процесса: расстояние между валками в пережиме, обжатие перед носком оправки, расстояние от захвата заготовки валками до носка оправки и т.д.

Разработанная методика позволяет с высокой достоверностью производить корректировку параметров прокатного инструмента и разрабатывать новый.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миронов Ю.М. Геометрические параметры процесса криволинейной прокатки // Производство труб: сб. науч. тр. УкрНИТИ. — Харьков: Metallurgizdat, 1962. — Вып. 6 — С.37-46.
2. Меркулов Д.В., Голубчик Р.М., Чепурин М.В. Особенности прошивки заготовок в косошальных станах разного конструктивного исполнения // Труды IV международного конгресса прокатчиков: в 2 т. — М: АО «Черметинформация». — 2002. — Т. 2. — С.82-87.
3. Определение геометрических параметров очага деформации в станах поперечно-винтовой прокатки / Ю.Г. Гуляев, Е.И. Шифрин, И.И. Лубе и др. // Сталь. — 2013. — № 11. — С.53-55.
4. Потапов И.Н., Полухин П.И. Технология винтовой прокатки — М.: Металлургия, 1990. — 344 с.
5. Скрипаленко М.М. Моделирование процессов прошивки с целью повышения эффективности производства полых трубных заготовок: Автореферат диссертации на соискание степени к.т.н. // Специальность 05.16.05 «Обработка металлов давлением». — М., 2007. — 21 с.
6. Корсаков А.А. Совершенствование технологии винтовой прокатки непрерывнолитой заготовки с целью уменьшения диаметра черновой трубы: Автореферат диссертации на соискание степени к.т.н. // Специальность 05.16.05 «Обработка металлов давлением». Челябинск., 2015. — 21 с.
7. Havaslii C., Yamakawa T. New methods piercing mills selling relating// ISIJ. intern., 1981. — Vol. 37. — P.12-55.
8. Горбатюк С.М., Осадчий В.А., Туктаров Е.З. Расчет геометрических параметров винтовой прокатки с помощью системы автоматизированного проектирования Autodesk Inventor // Металлург. — 2011. — № 8. — С.32-34.
9. Гармашев Д.Ю., Чуев А.В., Голубицкий А.С. Использование информационных технологий для планирования производства // Теория и практика металлургии. — 2009. — № 5-6. — С.75-79.

Поступила в редакцию 29.09.2017

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРОЦЕСУ ГВИНТОВОЇ ПРОКАТКИ ТРУБ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Рахманов С.Р., Гармашев Д.Ю., Степаненко О.М., Донець Д.А.

У даній роботі наведені результати дослідження процесу гвинтової прокатки труб з використанням деформаційно-геометричної моделі на основі блокових алгоритмів. Алгоритми математичної моделі у вигляді блокової структури дозволяють вводити нові або замінювати деякі блоки, з огляду на вплив того чи іншого фактора на процес прокатки труб (наприклад, кути подачі і розкатки). Моделювання та дослідження форми осередку деформації при прошивці суцільної та розкатки порожнистої заготовки виконано з урахуванням форми й параметрів робочих інструментів, що застосовуються на стані-елонгаторі, форми та величини площі контактної поверхні, що деформується, режимів налагодження базового устаткування стану в умовах роботи промислового ТПА 5-12". В роботі запропоновано у якості базової САПР графічний метод, заснований на одночасному твердотільному моделюванні в середовищах Компас-3D, Autodesk Inventor, SolidWorks, ANSYS або DEFORM-3D. Запропоновані методи, враховуючи простоту і високу точність побудов, дозволяють проводити дослідження основних параметрів процесу візуалізовано та ефективно, що обумовлює отримання необхідних даних. Крім того, дані продукти містять розвинені засоби створення користувачських бібліотек на всіх основних мовах програмування. Здійснено оцінювання точності розрахунку енергосилових параметрів процесу, геометричних параметрів гільз й коливань їх значень при моделюванні в виробничому експерименті. Моделювання процесу прокатки дозволило пояснити вплив технологічних параметрів процесу прокатки на якість та точність одержуваних гільз й розробити методику визначення точних параметрів процесу і раціональної калібровки інструменту. Моделювання процесу прокатки дозволяє проводити аналіз процесу і розроблювати коригувальні дії.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, кінцеві елементи, прошивні стани, труби.

THE ANALYSIS OF PECULARITIES OF THE PROCESS OF HELICAL PIPE-ROLLING WITH THE USE OF INFORMATION TECHNOLOGIES

Rakhmanov S.R.^a, Garmashev D.Yu.^b, Stepanenko A.N.^c, Donec D.A.^d

^a National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine

^b LLC Interpipe Ukraine, Dnipro, Ukraine

^c State Enterprise «GIPROMEZ», Dnipro, Ukraine

^d LLC Interpipe Nico Tub, Nikopol, Ukraine

In this paper, we present the results of a study of the process of helical rolling of pipes using a deformation-geometric model based on block algorithms. The algorithms of the mathematical model in the form of a block structure allow the introduction of new or replacement of existing blocks, taking into account the influence of one or another factor on the pipe rolling process (for example, the feeding and rolling angles). Simulation and study of the deformation focus shape during continuous flashing and rolling of the hollow billet was carried out taking into account the shape and parameters of the working tools used in the elongator, the shape and size of the contact surface area of the deformable metal and rolls, in working conditions of industrial injection molding machine 5-12". The paper suggests CAD system based on simultaneous solid modeling in Compass-3D, Autodesk Inventor, SolidWorks, ANSYS or DEFORM-3D environments. The proposed methods, taking into account the simplicity and high accuracy of the constructions, allow to conduct studies of the main parameters of the process efficiently and with visualization, which leads to the obtaining of necessary data. In addition, these products contain advanced tools for creating user libraries in all major programming languages. The accuracy of calculation of the energy-force parameters of the process, the geometric parameters of the shells and the oscillations of their values during simulation and in the production experiment are estimated. The modeling of the rolling process made it possible to explain the influence of the technological parameters of the rolling process on the quality and accuracy of the obtained shells and to develop a method for determining the exact process parameters and rational calibration of the tool. Modeling of the rolling process allows the analysis of the process and the development of corrective actions.

Keywords: computer modeling, finite elements, piercing mills, tubes.

REFERENCES

1. Mironov Yu.M. Geometricheskie parametryi protsessa kosoy prokatki [Geometrical parameters of the process of Skew rolling]. *Production of pipes: Sat. sci. tr. UkrNITI*, Kharkov, 1962, Issue. 6, P. 37-46. (in Russian).
2. Merkulov D.V., Golubchik R.M., Chepurin M.V. Osobennosti proshivki zagotovok v kosovalkovyih stanach raznogo konstruktivnogo ispolneniya [Features of firmware inserting in the skew-steels of different design execution]. *Proceedings of the IV International Congress of Rolling Machines: 2 tons*. Moscow, JSC Chermetinformation, 2002, T. 2, pp. 82-87. (in Russian).
3. Gulyaev Yu.G., Shifrin E.I., Lube I.I. et al. Opredelenie geometricheskikh parametrov ochaga deformatsii v stanach poperechno-vintovoy prokatki [Determination of the geometric parameters of the deformation focus in transverse screw rolling mills]. *Steel*, 2013, No. 11, pp. 53-55. (in Russian).
4. Potapov I.N., Polukhin P.I. Tehnologiya vintovoy prokatki [Screw rolling technology]. *Metallurgy*, Moscow, 1990, 344 p. (in Russian).
5. Skripalenko M.M. *Modelirovanie processov proshivki s celyu povysheniya effektivnosti proizvodstva polich trubnich zagotovok* [Modeling of processes of a firmware with the purpose of increase of efficiency of manufacture of hollow pipe billets]: the dissertation Author's abstract on competition of Candidate of Chemical Sciences, Specialty 05.16.05, Processing of metals by pressure, Moscow, 2007, 21 p. (in Russian).
6. Korsakov A.A. *Sovershenstvovanie tehnologii vintovoy prokatki neprerivnolitoj zagotovki s celyu ymensheniya diametra chernovoy trybi* [Perfection of the technology of screw rolling continuously-that billet in order to reduce the diameter of the roughing pipe]: the dissertation Author's abstract on competition of Candidate of Chemical Sciences, Specialty 05.16.05, Processing of metals by pressure, Chelyabinsk, 2015, 21 p. (in Russian).
7. Havaslii S., Yamakawa T. New methods piercing mills selling relating. *ISI. intern.*, 1981, Vol. 37, pp. 12-55.
8. Gorbatyuk S.M., Osadchiy V.A., Tuktarov E.Z. Raschet geometricheskikh parametrov vintovoy prokatki s pomoschyu sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya Autodesk Inventor [Calculation of the geometric parameters of helical rolling using the Autodesk Inventor automated design system]. *Metal-lurg*, 2011, Vol. 8, pp. 32-34. (in Russian).
9. Garmashev D.Yu., Chuev A.V., Golubitsky A.S. Ispol-zovanie informatsionnykh tehnologiy dlya planirovaniya proiz-vodstva [Use of information technologies for production plan-ning]. *Teoriya i praktika metallurgii*, 2009, № 5-6, pp. 75-79. (in Russian).

УДК 662.995

Сухий К.М.^а, Коломієць О.В.^а, Прокопенко О.М.^б, Гаврилко А.В.^а, Беляновська О.А.^а

АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ОБ'ЄМУ АДСОРБЦІЙНОГО ТЕПЛООВОГО АКУМУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМИ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ОПАЛЮВАННЯ

^а ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, Україна^б Національна металургійна академія України, м. Дніпро, Україна

Робота присвячена розробці ефективного алгоритму для розрахунку обсягу адсорбційного пристрою для акумулювання теплової енергії для децентралізованої системи опалення в приватному будинку. Пропонується наступна методика розрахунку: обчислення теплового навантаження для опалення, що включає розрахунок теплових втрат через зовнішні огорожі, і шляхом інфільтрації, а також внутрішніх тепловиділень, розрахунок максимальної адсорбції, теплоти адсорбції, визначення маси і об'єму адсорбенту. Максимальне значення адсорбції запропоновано розраховувати за характеристиками сорбенту або при відсутності даних для композитного адсорбенту як лінійну суперпозицію для механічної суміші. Масу адсорбенту запропоновано обчислювати як відношення теплового навантаження на опалення та теплоти адсорбції, а обсяг адсорбенту — маси та густини адсорбенту. Оцінювальний розрахунок теплового навантаження для приватного будинку був виконаний згідно запропонованого алгоритму, а оптимальний склад композитів «силікагель—натрій сульфат» і «силікагель—натрій ацетат» визначався відповідно до мінімального обсягу теплоакumuлюючого матеріалу. Як найнижчі значення об'ємів, так і максимальна ефективність композитних адсорбентів з масовим співвідношенням силікагеля і Na_2SO_4 або CH_3COONa 20:80 пояснюються максимальним значенням теплоти адсорбції. Оптимальні конструктивні і експлуатаційні характеристики адсорбційного теплового акумулятора були визначені за допомогою запропонованого алгоритму. Передбачається, що відносна вологість пароповітряного потоку становить 50–60%. Беручи до уваги оптимальні значення швидкості пароповітряного потоку $w < 0,6$ м/с, рекомендується застосовувати висоту адсорбуючого шару в діапазоні від 0,25 до 0,5 м.

Ключові слова: адсорбційний акумулятор теплової енергії, теплове навантаження на опалення, теплота адсорбції, композитний сорбент.

Постановка проблеми

Масштаби споживання палива на теплопостачання житлових приміщень в Україні досить великі. Так, витрата теплоти на опалення об'єктів однакової площі в Україні близько в 2–3 рази вище, ніж в Західній Європі [1]. Це є наслідком не лише низьких коефіцієнтів корисної дії котелень, але й загального зношування діючих теплових мереж. В цих умовах стають актуальними більш широке впровадження децентралізованих систем теплопостачання для споживачів, які розташовані на великих відстанях від ТЕС та котелень. При цьому їх експлуатація згідно з рекомендаціями конференції з клімату в Парижі в 2015 році (COP21) не повинно призводити до

зростання викидів парникових газів, а отже передбачає використання нетрадиційних джерел теплової енергії. Використання акумуляторів теплової енергії дозволяє істотно підвищити ефективність використання відновлюваних джерел теплопостачання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Адсорбенти десятиріччями розглядалися як перспективні для поглинання, акумулювання та трансформації теплової енергії [2]. Найбільш розповсюдженими в сучасних системах теплопостачання є теплоакumuлюючі модулі на основі ємнісних матеріалів. В той же час пристрої на основі подібних середовищ істотно обмежені за температурним інтервалом роботи та густиною

запасання енергії. Більш перспективними є фазово-перехідні теплові акумулятори. Широкому впровадженню стоїть на заваді висока корозійна активність застосовуваних матеріалів та жорсткі вимоги до джерела теплової енергії при регенерації. Найбільш перспективними та екологічно безпечними є адсорбційні теплові акумулятори, які суміщують акумулювання теплової енергії на основі оборотних процесів адсорбції – десорбції з ємнісним та фазово-перехідним механізмом.

Адсорбційні системи опалення на основі робочих пар «силікагель–вода» або «цеоліт13X–вода» розробляли в Австрії та Германії [3,4].

Водночас алгоритми розрахунків систем тепlopостачання з тепловими акумуляторами переважно базуються на ємнісних пристроях [5]. Тому задача розробки алгоритму розрахунку адсорбційних теплоакумуляуючих пристроїв набуває першочергового значення.

Формулювання мети дослідження

Хай відомі зовнішній об'єм будівлі, площа опалюваних приміщень та матеріал зовнішніх огорожень, а також схема системи децентралізованого опалення. Тоді, теплове навантаження опалення Q'_o , Вт вочевидь розраховується, як [6]:

$$Q'_o = Q'_t + Q'_и - Q'_{тв}, \quad (1)$$

де Q'_t – теплові втрати через зовнішні огороження, Вт, $Q'_и$ – теплові втрати внаслідок інфільтрації, Вт, $Q'_{тв}$ – внутрішні тепловиділення, Вт.

Необхідно визначити масу адсорбенту, яка відповідає тепловому навантаженню на опалення. Для досягнення цієї мети слід визначити теплоту адсорбції

$$\Delta H_{\text{адс}} = \Delta h \cdot a \cdot \frac{1000}{M}, \quad (2)$$

де Δh – теплота адсорбції речовини (вода), яка сорбується, кДж/моль, a – гранична адсорбція, г/г, M – молярна маса адсорбованої речовини, г/моль.

Граничну адсорбцію можна визначати за характеристиками сорбенту, або при відсутності даних для композитного адсорбенту, як лінійну суперпозицію для механічної суміші:

$$a = \sum_{i=1}^N a_i \cdot x_i, \quad (3)$$

де a_i – гранична адсорбція i -го компонента, x_i – його масова доля в адсорбенті.

Тоді масу адсорбенту визначають за відношенням:

$$M = \frac{Q'_o}{\Delta H_{\text{адс}}}, \quad (4)$$

а об'єм, м^3 згідно з:

$$V = \frac{M}{\rho}, \quad (5)$$

де ρ – густина адсорбенту, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Таким чином, запропонований алгоритм передбачає теплове навантаження на опалення, яке включає розрахунок теплових втрат через зовнішні огороження та внаслідок інфільтрації внутрішніх тепловиділень, граничної адсорбції, теплоти адсорбції, визначення маси адсорбенту та об'єму адсорбенту (рис. 1).

Мета дослідження – визначення оптимального складу сорбенту, який відповідає тепловому навантаженню на опалення при мінімальних габаритних розмірах теплоакумуляуючого пристрою.

Викладення основного матеріалу дослідження

Схема децентралізованої системи опалення наведена на рис. 2. Для даних умов пропонується використовувати систему опалення зі штучною циркуляцією. Основним ключовим моментом такої систем є циркуляційний насос. Під його впливом теплоносій йде до батарей, а потім до нагрівального приладу. При монтажі

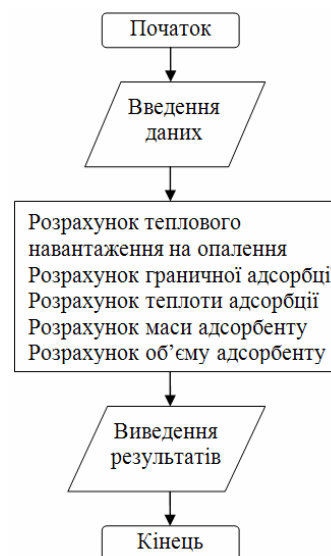


Рис. 1. Блок-схема алгоритму розрахунку маси сорбенту та об'єму адсорбційного теплоакумуляуючого пристрою

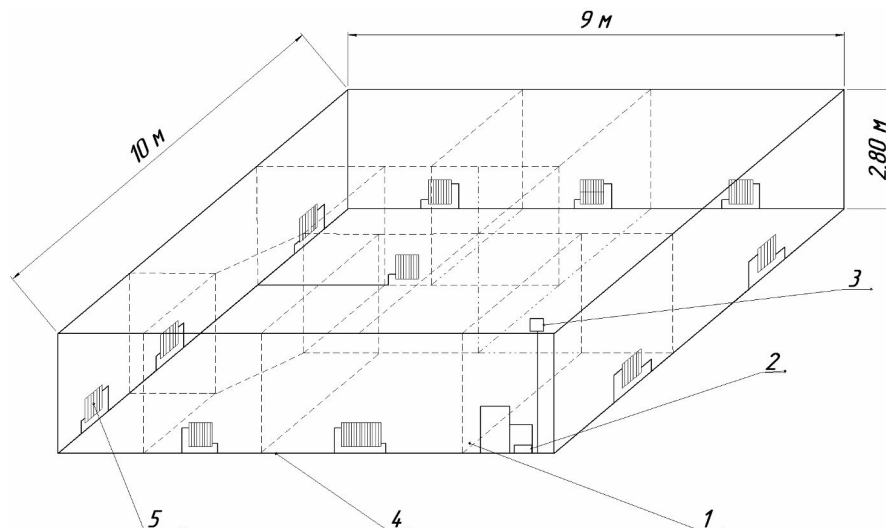


Рис. 2. Схема децентралізованої системи опалення приватного будинку: 1 – тепловий акумулятор; 2 – насос; 3 – розширювальний бак; 4 – поліпропіленові труби; 5 – алюмінієва батарея

такої системи немає необхідності в постійному ухилі труб. Зовнішній об'єм будинку пропонується прийняти 289,8 м³. Коефіцієнт скління (відношення поверхні вікон до загальної поверхні вертикальних зовнішніх огорожень) $\phi=0,25$. Коефіцієнти теплопередачі стін, вікон, стелі та підлоги: $k_{ст}=0,49$ Вт/(м²·°C); $k_{ок}=1,48$ Вт/(м²·°C); $k_{пт}=0,31$ Вт/(м²·°C); $k_{пл}=0,42$ Вт/(м²·°C).

Коефіцієнти зниження розрахункової різниці температур для стін, вікон, стелі та підлоги: $\Psi_{т}=\Psi_{ок}=1$; $\Psi_{пт}=0,8$; $\Psi_{пл}=0,6$. Температура внутрішнього повітря $t_{в.р.}=18^{\circ}\text{C}$, а розрахункова для опалення температура зовнішнього повітря $t_{н.о.}=-23^{\circ}\text{C}$. Об'ємний коефіцієнти будівлі прийнято $K_{об}=5$ м³/м², а питомі тепловиділення (на 1 м² житлової площі) – $q_{т.в.}=20$ Вт/м².

Оціночний розрахунок тепловтрат через огорожувальні конструкції та теплове навантаження на опалення розраховані згідно з [6,7]. Теплове навантаження на опалення 3929,3 Вт, що відповідає близько 339,5 МДж за добу.

В якості адсорбенту запропоновано використовувати композит «силікагель–натрій сульфат» або «силікагель–натрій ацетат». Результати розрахунку теплоти адсорбції і маси сорбен-

ту при тепловому навантаженні на опалення 339,5 МДж/добу і масовому співвідношенню силікагелю та Na₂SO₄ або CH₃COONa 20:80, 40:60, 60:40 та 80:20, які представлено в табл. 1 та 2. Вочевидь, зі зростанням вмісту натрій сульфату об'єм шару адсорбенту має зменшуватись. Найбільш ефективним є вочевидь композитний адсорбент з масовим співвідношенням силікагелю та Na₂SO₄ або CH₃COONa 20:80. Крім того, маса та об'єм шару адсорбенту визначаються теплотою адсорбції.

Таблиця 1
Результати розрахунку теплоти адсорбції і маси сорбенту «силікагель–Na₂SO₄» при тепловому навантаженні на опалення 339,5 МДж/добу

Вміст силікагелю, %	Вміст Na ₂ SO ₄ , %	Величина адсорбції, а, кг/кг	$\Delta H_{адс}$, кДж/кг	М, кг	V , м ³
20	80	1,046	3486,67	97,368	0,135
40	60	0,822	2740,00	123,9	0,172
60	40	0,598	1993,33	170,31	0,237
80	20	0,374	1246,70	272,31	0,378

Більш високі значення теплоти адсорбції і,

Таблиця 2
Теплота адсорбції і маса сорбенту «силікагель–CH₃COONa» при тепловому навантаженні на опалення 339,5 МДж/добу

Вміст силікагелю, %	Вміст CH ₃ COONa, %	Величина адсорбції, а, кг/кг	$\Delta H_{адс}$, кДж/кг	М, кг	V , м ³
20	80	0,557	1856,10	182,91	0,277
40	60	0,455	1517,07	223,79	0,339
60	40	0,353	1178,05	288,19	0,437
80	20	0,252	839,02	404,64	0,613

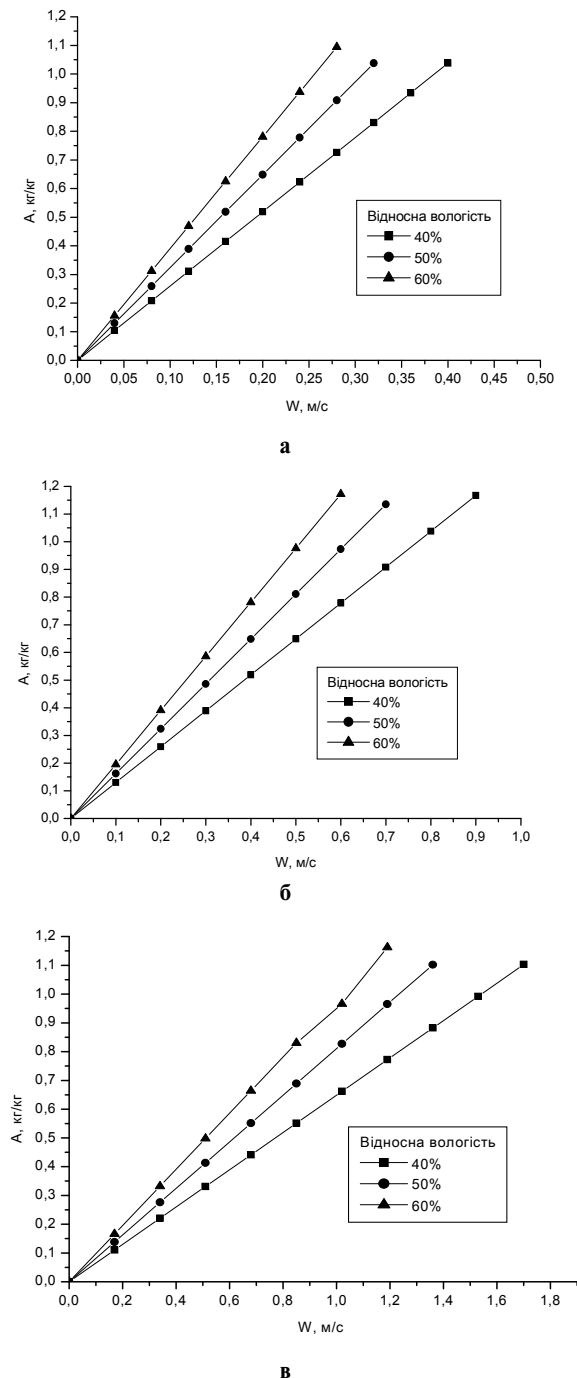


Рис. 3. Залежність величини сорбції від швидкості парогазового потоку та висоти шару композиту та відносній вологості повітря: а – $H=0,25$ м; б – $H=0,5$ м; в – $H=1$ м

отже, менші маси та об'єми сорбентів встановлені для композиту «силікагель–натрій сульфат», який є більш ефективним в порівнянні з композитом «силікагель–натрій ацетат». В той же час температура регенерації композиту «силікагель–натрій сульфат» дорівнює 90°C , а «силікагель–натрій ацетат» 60°C .

Крім того, доцільно оцінити вплив конструктивних характеристик теплоакumuлюючого пристрою, зокрема, висоти шару адсорбенту, на величину адсорбції. Розрахунок був виконаний за допомогою алгоритму, запропонованого в [8].

В результаті моделювання була визначена залежність величини адсорбції від швидкості пароповітряного потоку при температурі 60°C при відносній вологості повітря 40, 50 та 60% (рис. 3).

Максимальні значення адсорбції протягом 8 год спостерігаються при відносній вологості 60% та швидкостях пароповітряного потоку $w=0,2\text{--}0,35$ м/с (висота шару композиту $H=0,25$ м), $0,6\text{--}0,85$ м/с ($H=0,5$ м) та $1,1\text{--}1,7$ м/с ($H=1,0$ м). Таким чином, оскільки доцільно використовувати $w<0,6$ м/с, можна рекомендувати висоту шару композиту $0,25\text{--}0,5$ м.

Висновки

Запропоновано алгоритм розрахунку маси та об'єму адсорбенту для теплового акумулятора в системах децентралізованого опалення. Запропонований алгоритм дозволяє визначити оптимальний склад адсорбенту для використання в теплоакumuлюючих пристроях систем опалення в приватних будинках.

Робота виконана за підтримки Державного фонду фундаментальних досліджень (номер державної реєстрації 0116U001489).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Єнін П.М., Швачко Н.А. Теплостачання: Навч. посіб. – Ч. 1. Теплові мережі та споруди. – К.: Кондор, 2007. – 244 с.
2. Yu N., Wang R.Z., Wang L.W. Sorption thermal storage for solar energy // Progress in Energy and Combustion Science. – 2013. – Vol. 39. – pp. 489-514.
3. Hauer A. Adsorption systems for TES/design and demonstration projects // Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption. – 2007. – pp. 409-427.
4. Hauer A. Thermal energy storage with zeolite for heating and cooling applications // Proceedings of 3rd workshop of annex 17 ECES IA/IEA. – 2002. – № 3. – pp.234-239.
5. Ганжа И.Г., Хищенко А.Г. Тепловое аккумулярование как способ повышения энергетической эффективности систем теплоснабжения // Энергосбережение – Энергетика – Энергоаудит. – 2012. – № 3 (97). – С.16-21.
6. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 472 с.
7. Сафонов А.П. Сборник задач по теплофикации и тепловым сетям: Учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 232 с.

8. Operating processes parameters of open-type heat storage devices in heat supply systems / E.A. Belyanovskaya, K.M. Sukhyy, O.V. Kolomiyets, M.P. Sukhyy // Наукові праці ОНАХТ. — 2017. — Т. 81, вип. 1. — С.4-9.

Надійшла до редакції 31.10.2017

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ОБЪЕМА АДсорбЦИОННОГО ТЕПЛОВОГО АКУМУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ОТОПЛЕНИЯ

Сухой К.М., Коломиец Е.В., Прокопенко Е.М., Гаврилко А.В., Беляновская Е.А.

Работа посвящена разработке эффективного алгоритма для расчета объема адсорбционного устройства для аккумуляции тепловой энергии для децентрализованной системы отопления в частном доме. Предлагается следующая методика расчета: вычисление тепловой нагрузки для отопления, включающей расчет тепловых потерь через внешние ограждения, и путем инфильтрации, а также внутренних тепловыделений, расчет максимальной адсорбции, теплоты адсорбции, определение массы и объема адсорбента. Максимальное значение адсорбции предложено рассчитывать по характеристикам сорбента или при отсутствии данных для композитного адсорбента как линейную суперпозицию для механической смеси. Массу адсорбента предложено вычислять как отношение тепловой нагрузки на отопление и теплоты адсорбции, а объем адсорбента — как частное массы и плотности адсорбента. Оценочный расчет тепловой нагрузки для частного дома был выполнен по предлагаемому алгоритму, а оптимальный состав композитов «силикагель-сульфат натрия» и «силикагель-ацетат натрия» определялся в соответствии с минимальным объемом теплоаккумулирующего материала. Как самые низкие значения объемов, так и максимальная эффективность композитных адсорбентов с массовым соотношением силикагеля и Na_2SO_4 или CH_3COONa 20: 80 объясняются максимальным значением теплоты адсорбции. Оптимальные конструктивные и эксплуатационные характеристики адсорбционного теплового аккумулятора были определены с помощью предложенного алгоритма. Предполагается, что относительная влажность паровоздушного потока составляет 50–60%. Принимая во внимание оптимальные значения скорости паровоздушного потока $w < 0,6 \text{ м/с}$, рекомендуется применять высоту адсорбирующего слоя в диапазоне от 0,25 до 0,5 м.

Ключевые слова: адсорбционный аккумулятор тепловой энергии, тепловая нагрузка на отопление, композитный сорбент, теплота адсорбции, конструктивные характеристики композитный сорбент.

CALCULATION ALGORITHM OF VOLUME OF ADSORPTIVE HEAT STORAGE DEVICE FOR DECENTRALIZED SPACE HEATING SYSTEM

Sukhyy K.M.^a, Kolomiyets E.V.^a, Prokopenko O.M.^b, Gavrilko A.V.^a, Belyanovskaya E.A.^a

^a Ukrainian State University of Chemical Engineering, Dnipro, Ukraine

^b State Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine

The work is devoted to the development of an efficient algorithm for calculating the volume of the adsorptive thermal energy storage device for a decentralized heating system in a private house. The following computation procedure is proposed to include: calculation of thermal load for heating involving the determination of thermal losses through external fences, thermal losses due to infiltration and internal heat dissipation, the reckoning of maximal adsorption, adsorption heat, determination of adsorbent mass and adsorbent volume. The maximal adsorption value is suggested to be calculated by the characteristics of the sorbent, or in the absence of data for a composite adsorbent, as a linear superposition for a mechanical mixture. The adsorbent mass is estimated as a ratio of a thermal load for heating and adsorption heat. The adsorbent volume is calculated as quotient of mass and density of adsorbent. An evaluative calculation of the heat load for a private house was carried out by the proposed algorithm, and the optimal composition of the composite adsorbents 'silica gel-sodium sulfate' and 'silica gel-sodium acetate' being determined according to the minimal volume of the layer of heat storage material. Both the lowest volume values and the highest efficiency of a composite adsorbents with a mass ratio of silica gel and Na_2SO_4 or CH_3COONa 20: 80 are explained by the maximum value of adsorption heat. Optimal construction and operating characteristics of adsorptive heat storage device were determined by the proposed algorithm. The relative degree of humidity of vapor-air flow is suggested to be 50–60%. Having taken into account optimal values of vapor-air flow rate $w < 0.6 \text{ m/s}$, it is advisable to apply heights of adsorbent layer in the range from 0.25 m to 0.5 m.

Keywords: adsorptive heat storage device, heat load, composite sorbent, heat of adsorption, construction characteristics.

REFERENCES

1. Yenin P.M., Shvachko N.A. *Teplopostachannya (Chastina I. Teplovi meregi ta sporudy)* [Heat supply (Part I. Heat networks and constructions)]. Kondor, Kiev, 2007. 244 p. (in Ukraine).
2. Yu N., Wang R.Z., Wang L.W. Sorption thermal storage for solar energy. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2013, vol. 39, pp. 489-514.
3. Hauer A. Adsorption systems for TES/design and demonstration projects. *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption*, 2007, pp. 409-427.
4. Hauer A. Thermal energy storage with zeolite for heating and cooling applications. *Proceedings of 3rd workshop of annex 17 ECES IA/IEA*, 2002, № 3, pp. 234-239.
5. Ganga I.G., Khiminko A.G. *Teplovoe akkumulirovanie kak sposob povysheniya energeticheskoy effektivnosti system teplo-snabzheniya* [Heat storage as a method of enhancing of energy efficiency of heat supply system]. *Energoberegenie — Energetika — Energoaudit*, 2012, № 03 (97), pp. 16-21. (in Russian).
6. Sokolov E.Ya. *Tepoficatsiya i teplovie seti* [District heating and heat networks]. Moscow, MEI, 2001. 472 p. (in Russian).
7. Safonov A.P. *Sbornik zadach po teploficatsii i teplovim setyam* [Book of tasks for district heating and heat networks]. Moscow, Energoatomizdat, 1985. 232 p. (in Russian).
8. Belyanovskaya E.A., Sukhyy K.M., Kolomiyets O.V., Sukhyy M.P. Operating processes parameters of open-type heat storage devices in heat supply systems. *Scientific works of Odessa National Academy of Food Technology*, 2017, vol. 81, № 1, pp. 4-9.

УДК 681.5.015.27

*Тітова О.В., Мінакова Н.О., Шуть О.Ф., Гнатко О.М.***ПАРАМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ МОДЕЛЕЙ ДИНАМІКИ ОБ'ЄКТІВ РЕГУЛЮВАННЯ****ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, Україна**

В даній роботі приділено увагу проблемі параметричної ідентифікації моделей динаміки триємнісних об'єктів. При наявності математичних моделей динаміки об'єктів можна достатньо точно виконати розрахунки оптимальних налагоджень регуляторів з отриманням бажаного виду перехідного процесу регулювання, здійснити моделювання автоматичних систем регулювання ще на стадії їх проектування, використавши ПЕОМ. Відомі методи параметричної ідентифікації мають невисоку точність і зазвичай потребують перетворення отриманих рівнянь в передатні функції або в системи диференціальних рівнянь першого порядку для більшої зручності їх використання. Метою роботи було визначення за графічним зображенням кривої розгону триємнісного об'єкта всіх параметрів моделі динаміки з максимальною точністю. В статті наведено порядок графічного опрацювання кривої розгону з позначенням характерних параметрів і надано алгоритм параметричної ідентифікації математичних моделей динаміки триємнісних об'єктів. Запропонований розрахунковий метод визначення сталих часу T_1 , T_2 та T_3 триємнісних об'єктів з використанням ідеальних кривих розгону, які згуртовані за сумою величин ординат характерних точок в три окремі групи, що теж дало можливість суттєво підвищити точність параметричної ідентифікації. Запропонований метод ідентифікації параметрів моделей динаміки триємнісних об'єктів дає можливість найбільш точно визначити суму S всіх сталих часу ідеальних кривих розгону. При ідентифікації параметрів моделей динаміки реальних об'єктів запропоновано здійснювати пошук точки перегину за величиною та знаком різниці $\Delta T'_2$ шляхом коректування вхідних даних і виконання декількох повторних розрахунків, доки різниця $\Delta T'_2$ не досягне встановленого мінімального значення.

Ключові слова: параметрична ідентифікація, триємнісний об'єкт, крива розгону, сталі часу, динамічна характеристика, об'єкт регулювання.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень та публікацій

Точні відомості про динамічні характеристики об'єктів регулювання є важливою основою синтезу якісних автоматичних систем регулювання (АСР) [1,2]. При наявності математичних моделей динаміки об'єктів можна достатньо точно виконати розрахунки оптимальних налагоджень регуляторів з отриманням бажаного виду перехідного процесу регулювання, виконати моделювання АСР ще на стадії їх проектування, використавши ПЕОМ [3].

Раніше нами були виконані роботи з параметричної ідентифікації моделей динаміки двоємнісних об'єктів [4], але переважно більшість об'єктів регулювання можна розглядати як

триємнісні, адже до складу регульованої частини АСР відносяться три основні її елементи: виконавчий пристрій, безпосередньо об'єкт регулювання та вимірювальний прилад регульованого параметра. Якщо об'єкт регулювання надати у вигляді трьох послідовно з'єднаних аперіодичних ланок першого порядку, як це показано на рис. 1, то основними параметрами моделі динаміки такого об'єкта будуть три сталі часу: T_1 , T_2 та T_3 , визначення яких і є основною задачею параметричної ідентифікації моделей.

Відомий метод асимптот [5] при параметричній ідентифікації моделей динаміки триємнісних об'єктів дозволяє отримувати коефіцієнти рівняння часової характеристики, наданої у вигляді суми експонент. Якщо необхідно отри-

мати математичну модель об'єкта у вигляді диференціального рівняння третього та більш високих ступенів, то використовують метод площин [6,7]. Ці методи мають невисоку точність параметричної ідентифікації і зазвичай потребують перетворення отриманих рівнянь в передатні функції або в системи диференціальних рівнянь першого порядку для більшої зручності їх використання.

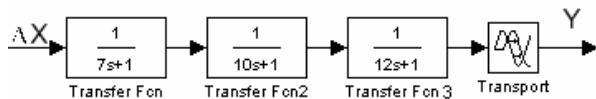


Рис. 1. Структура триємнісного об'єкта з запізнюванням

Формулювання цілей статті

В цій роботі за мету поставлено визначити за графічним зображенням кривої розгону триємнісного об'єкта всі параметри моделі динаміки з максимально можливою точністю.

Виклад основного матеріалу дослідження

Залежності сталих часу моделей динаміки вивчали на ідеальних кривих розгону об'єктів, які будували за допомогою комп'ютерної техніки за заздалегідь вибраними моделями. На рис. 2 зображено, як приклад, порядок графічного опрацювання кривої розгону з позначенням характерних параметрів, які легко визначаються з врахуванням масштабу рисунка. Отже з кривої розгону визначали такі характерні параметри:

- T_0 – загальна стала часу, хв;
- T_2' – інтервал часу від точки перегину кривої до точки перетину дотичної з усталеним значенням вихідного параметру, хв;
- Φ_0 – загальний час запізнювання, хв;
- Φ_n – час перехідного (ємнісного) запізнювання, хв;
- Y_n – величина ординати до точки перетину кривої розгону перпендикуляром, встановленим з початкової точки дотичної, %;
- Y_n – величина ординати точки перегину кривої розгону, %;
- Y_k – величина ординати точки перетину кривої перпендикуляром, встановленим з кінцевої точки дотичної, %.

З кривої розгону також визначають коефіцієнт передачі об'єкта K_0 за формулою

$$K_0 = \frac{Y_{уст} - Y_0}{\Delta X}, \quad (1)$$

де $Y_{уст}$ і Y_0 – відповідно нове усталене та початкове значення вихідного параметра, %; ΔX – величина ступеневого збурювання на вході

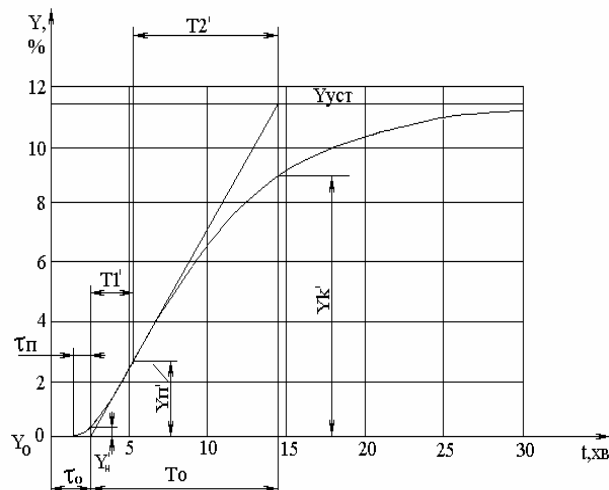


Рис. 2. Графічне опрацювання кривої розгону з позначенням характерних параметрів

об'єкта, %.

Необхідно звернути увагу на відомий факт, що від переміни місцями ланок в структурній схемі об'єкта (рис. 1) вигляд кривої розгону вихідного параметра не змінюється. Тому при моделюванні триємнісних об'єктів ланки їх будемо розташовувати в послідовності збільшення їх сталих часу, тобто $T_1 < T_2 < T_3$. В реальних ситуаціях ланки моделі повинні розташовуватись у відповідності з розташуванням їх елементів.

Відносно величини ординат трьох характерних точок, які показані на кривій розгону, можна відмітити, що ці величини залежать не тільки від значень T_1 , T_2 та T_3 , а також від значення коефіцієнта передачі об'єкта K_0 і величини нанесеного на об'єкт ступеневого збурювання ΔX . Тому величини ординат необхідно скорегувати і привести їх до прийнятних нам базових значень $K_0=1$ і $\Delta X=10\%$, використавши для цього формулу

$$Y_n = \frac{Y_n' \cdot 10}{K_0 \cdot \Delta X}; \quad Y_{\Pi} = \frac{Y_{\Pi}' \cdot 10}{K_0 \cdot \Delta X}; \quad Y_k = \frac{Y_k' \cdot 10}{K_0 \cdot \Delta X}. \quad (2)$$

Спроби отримати залежності сталих часу T_1 , T_2 та T_3 від характерних параметрів кривої розгону у вигляді лінійних рівнянь регресії для всього діапазону зміни їх не дали бажаних результатів, адже ці залежності суттєво нелінійні. Щоб не ускладнювати розрахунки при створенні математичної моделі використали метод кусочно-лінійної апроксимації. Це означає, що весь діапазон зміни сталих часу досліджуваних кривих розгону необхідно було розділити на декілька піддіапазонів і для кожного із них створити

свою математичну модель. Якщо в об'єкті сталі часу двох ланок, наприклад, T_2 та T_3 за величиною близькі між собою і кожна із них значно більша від сталої часу T_1 , то такий об'єкт можна вважати приближеним до двоємнісного. Можливий і такий характерний варіант, коли сталі часу T_1 та T_2 за величиною зовсім незначні в порівнянні зі сталою часу T_3 і такий об'єкт можна вважати одноємнісним з запізнюванням.

Виконаний аналіз досліджуваних кривих розгону триємнісних об'єктів показав, що чим ближче наближаються між собою сталі часу T_1 , T_2 та T_3 , тим більшими за величиною стають всі три їх ординати характерних точок і величини цих ординат досягають максимального значення у випадку, коли всі сталі часу за величиною є однаковими, тобто $T_1=T_2=T_3$.

Враховуючи те, що на форму кривої розгону реального об'єкту мають суттєвий вплив зміни сторонніх факторів та інші вади, то в наших розрахунках для розподілу досліджуваних кривих розгону у відповідні групи використовується сумарне значення величини ординат:

$$Y_s = Y_H + Y_{II} + Y_K. \quad (3)$$

На рис. 3 надано складений нами алгоритм параметричної ідентифікації математичних моделей динаміки триємнісних об'єктів.

Розрахунок сталих часу триємнісного об'єкта розпочинається розрахунком інтервалу часу T'_{2p} використанням рівняння регресії:

$$T'_{2p} = 16,9424 + 0,9257 \cdot T_0 - 1,1628 \cdot \tau_{II} + 5,4803 \cdot Y_H + 0,6342 \cdot Y_{II} + 2,6431 \cdot Y_K. \quad (4)$$

Після цього розраховують різницю між T'_2 , визначеним з графіка кривої розгону та його розрахунковим значенням T'_{2p} :

$$\Delta T'_2 = \frac{T'_2 - T'_{2p}}{T'_{2p}} \cdot 100. \quad (5)$$

Величина цієї відносної різниці $\Delta T'_2$ характеризує точність визначення на графіку кривої розгону точки перегину і, відповідно, величини її ординати Y' , а також точність встановлення дотичної в точці перегину кривої. В більшості випадків при опрацюванні кривої розгону T_0 має значення більше того, яке є в дійсності, а від цього суттєво залежить точність розрахунку па-

раметрів моделі динаміки. Отже з метою підвищення точності визначення сталих часу T_1 , T_2 та T_3 рекомендується виконувати розрахунок відносного значення різниці $\Delta T'_2$ декілька разів, змінюючи кожен раз значення Y'_{II} та T'_2 , а також T_0 та T'_K . Якщо $\Delta T'_2$ має від'ємне значення і воно складає менше -1% , то треба збільшувати T'_2 , тобто точку перегину перемістити по кривій вниз, і навпаки, точку перегину перемістити вверх, якщо $\Delta T'_2$ має значення більше 1% , а також зменшити T_0 і відповідно Y'_K . Таку процедуру розрахунків завершують, якщо значення $\Delta T'_2$ знаходиться в інтервалі $(1\% \div 1\%)$.

Якщо апіорі відомо, що об'єкт складається з трьох однакових послідовно з'єднаних елементів, то всі сталі часу його теж однакові і визначати їх слід за формулами:

$$S = 0,8113 \cdot T_0; \quad (6)$$

$$T_1 = T_2 = T_3 = \frac{S}{3}. \quad (7)$$

Сумарна величина ординат характерних точок кривої розгону в цьому випадку становить $Y_s > 11,9\%$, що і слід вважати першою групою кривих розгону з близькими за значеннями сталими часу.

У всіх інших випадках процедуру визначення значень сталих часу T_1 , T_2 та T_3 виконують за таким алгоритмом. Спочатку визначають залежність суми $S = T_1 + T_2 + T_3$ від значення найбільш впливових вказаних вище характерних параметрів кривої розгону. Потім таку ж залежність визначають для суми $S_{23} = T_2 + T_3$ і на решті визначають залежність сталої часу T_3 від тих же параметрів кривої розгону. Далі визначають сталі часу за різницею:

$$T_1 = S - S_{23}; \quad (8)$$

$$T_2 = S_{23} - T_3. \quad (9)$$

Досліджувані криві розгону за величинами суми ординат характерних точок Y_s розділити ще на дві групи і для кожної із цих груп визначили рівняння регресії для розрахунку S — суми всіх трьох сталих часу, S_{23} — суми сталих часу T_2 та T_3 і окремо сталої часу T_3 .

Друга група: $Y_s = 11,0 \div 11,9$:

$$S = 21,0175 + 0,685 \cdot T_0 + 0,6157 \cdot \tau_{II} + 1,3585 \cdot Y_H + 0,2573 \cdot Y_{II} - 2,7417 \cdot Y_K; \quad (10)$$

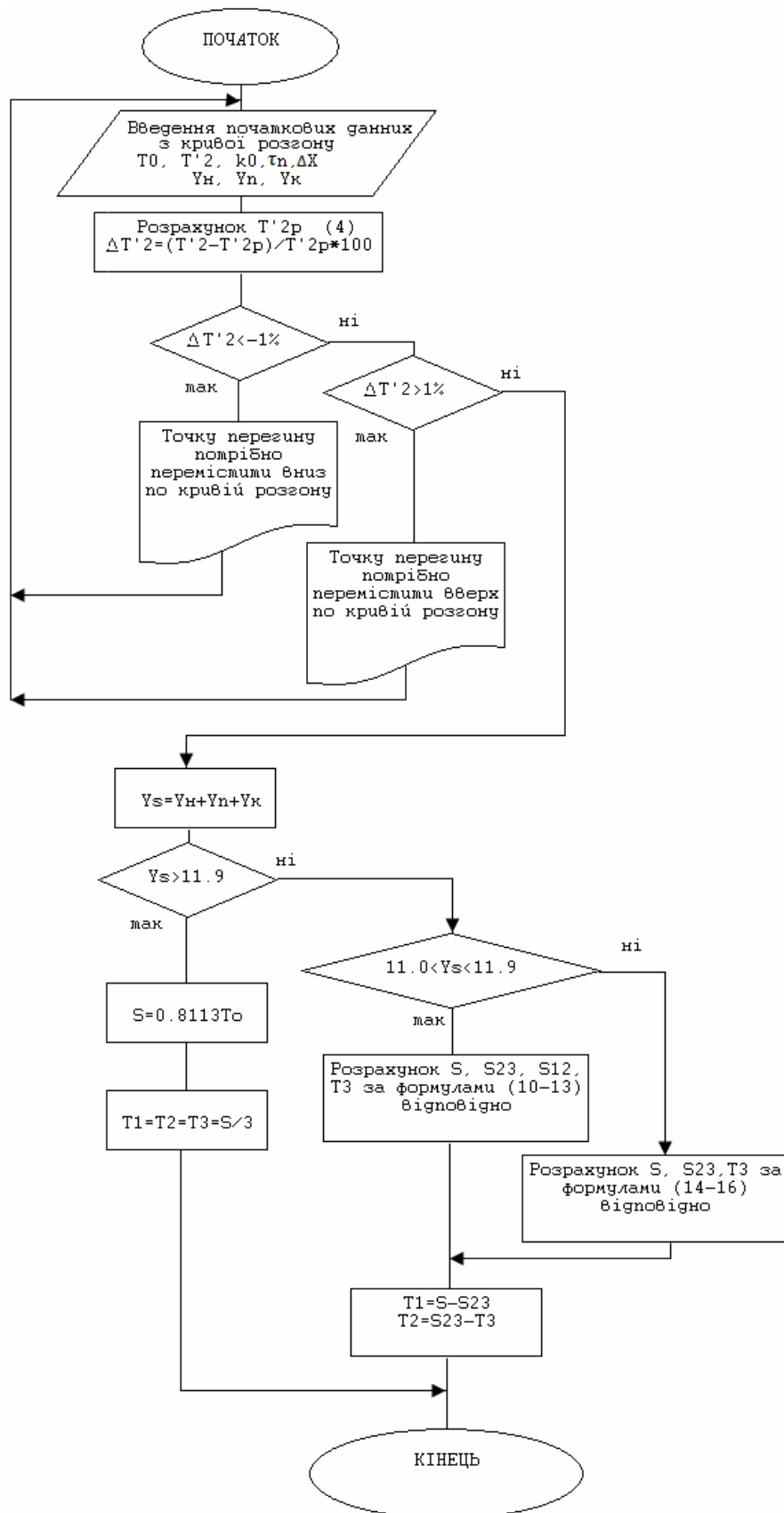


Рис. 3. Алгоритм параметричної ідентифікації математичних моделей динаміки триємнісних об'єктів

$$S_{23} = -11,856 - 0,0159 \cdot T_0 - 3,5961 \cdot \tau_{II} + 9,4673 \cdot Y_H + 0,0472 \cdot Y_{II} + 0,9003 \cdot Y_K + 1,7028 \cdot S; \quad (11)$$

$$S_{12} = -75,7718 + 1,2188 \cdot T_0 - 0,9266 \cdot \tau_{II} - 4,0083 \cdot Y_H - 0,3755 \cdot Y_{II} + 9,5919 \cdot Y_K - 0,9061 \cdot S_{23}; \quad (12)$$

$$T_3 = 28,826 - 0,1154 \cdot T_0 + 1,7096 \cdot \tau_{II} + 0,007 \cdot Y_H + 0,1299 \cdot Y_{II} - 3,5605 \cdot Y_K + 0,6974 \cdot (S_{23} - S_{12}). \quad (13)$$

Третя група: $Y_S < 11,0$:

$$S = 22,005 + 0,9952 \cdot T_0 - 1,0748 \cdot \tau_{II} + 18,0468 \cdot Y_H + 0,4619 \cdot Y_{II} - 3,8199 \cdot Y_K; \quad (14)$$

$$S_{23} = -3,009 + 0,97 \cdot T_0 - 1,4444 \cdot \tau_{II} + 9,6443 \cdot Y_H - 1,0793 \cdot Y_{II} + 0,2432 \cdot Y_K; \quad (15)$$

$$T_3 = 81,205 + 1,0676 \cdot T_0 - 3,0982 \cdot \tau_{II} + 38,0184 \cdot Y_H + 1,274 \cdot Y_{II} - 11,2811 \cdot Y_K - 11,9666 \cdot \left(\frac{S_{23}}{S} \right). \quad (16)$$

На основі наданого алгоритму параметричної ідентифікації розроблено програму розрахунку, яка використовується в навчальному процесі кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій і метрології.

Висновки

1. Запропонований метод ідентифікації параметрів моделей динаміки триємнісних об'єктів дає можливість найбільш точно визначити суму S всіх сталих часу ідеальних кривих розгону (коефіцієнт кореляції $R=0,999$, залишкова дисперсія $S^2_{\text{зал}}=0,1$ при середньому значенні суми $S=22$ хв) Менш точно визначаються суми двох сталих часу та кожна з них окремо.

2. В роботі відпрацьовано алгоритм розрахунку сталих часу об'єктів за ідеальними кривими розгону, які згуртовані за сумою величин ординат характерних точок в три окремі групи, що теж дало можливість суттєво підвищити

точність параметричної ідентифікації.

3. При ідентифікації параметрів моделей динаміки реальних об'єктів запропоновано здійснювати пошук точки перегину за величиною та знаком різниці $\Delta T'_2$ шляхом коректування вхідних даних і виконання декількох повторних розрахунків, доки різниця $\Delta T'_2$ не досягне встановленого мінімального значення. Ця процедура теж сприяє підвищенню точності визначення сталих часу реальних об'єктів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Карабутов Н.Н. Адаптивная идентификация систем: информационный синтез. — М.: КомКнига, 2006. — 384 с.
2. Дубовой В.М., Кабачій В.В., Паночішин Ю.М. Контроль та керування в мережах теплопостачання: монографія. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. — 190 с.
3. Перов В.Л. Основы теории автоматического регулирования химико-технологических процессов. — М.: Химия, 1970. — 351 с.
4. Блонський С.Д., Шуть О.Ф., Левчук І.Л. Визначення параметрів динамічних характеристик двоємнісних об'єктів керування // Вопр. химии и хим. технологии. — 2006. — № 4. — С.208-210.
5. Petrovas A., Rinkeviciene R. Automatic Control Theory I, II: A Laboratory Manual. — Vilnius: Technika, 2012. — 98 p.
6. Кравцов А.Ф., Зайцева Е.В., Чуйко Ю.Н. Расчет автоматических систем контроля и регулирования металлургических процессов. — К.: Вища шк., 1981. — 320 с.
7. Дубовой В.М. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів і систем керування: навчальний посіб. — Вінниця: ВНТУ, 2012. — 308 с.

Надійшла до редакції 21.10.2017

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ ОБЪЕКТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Титова Е.В., Минакова Н.А., Шуть А.Ф., Гнатко Е.Н.

В данной работе уделено внимание проблеме параметрической идентификации моделей динамики трехмостных объектов. Известны методы параметрической идентификации имеют невысокую точность и обычно требуют преобразования полученных уравнений в передаточные функции или в системы дифференциальных уравнений первого порядка для большего удобства их использования. Целью работы было определение по графическим изображением кривой разгона трехмостного объекта все параметры модели динамики с максимальной точностью. В статье приведен порядок графической обработки кривой разгона с обозначением характерных параметров и представлены алгоритм параметрической идентификации математических моделей динамики трехмостных объектов. Предложенный расчетный метод определения постоянных времени T_1 , T_2 и T_3 трехмостных объектов с использованием идеальных кривых разгона, которые сгруппированы по сумме величин ординат характерных точек в три отдельные группы, тоже позволило существенно повысить

точность параметрической идентификации. Предложенный метод идентификации параметров моделей динамики трехемкостных объектов дает возможность наиболее точно определить сумму S всех постоянных времени идеальных кривых разгона. При идентификации параметров моделей динамики реальных объектов предложено проводить поиск точки перегиба по величине и знаку разницы $\Delta T'_2$ путем корректировки входных данных и проведение нескольких повторных расчетов, пока разница $\Delta T'_2$ не достигнет установленного минимального значения.

Ключевые слова: параметрическая идентификация, трехемкостной объект, кривая разгона, постоянные времени, динамическая характеристика, объект регулирования.

PARAMETRIC IDENTIFICATION OF DYNAMICS MODELS OF REGULATED OBJECTS

Titova O.V., Minakova N.O., Shut O.F., Gnatko O.M.

Ukrainian State Chemical Technology University, Dnipro, Ukraine

In this work attention is paid to the problem of parametric identification of dynamics models of three-capacity objects. When mathematical models of the objects dynamics exist, it is possible to accurately perform calculations of the optimal settings of regulators with the desired type of transition control process, to carry out the modeling of the automatic control systems at the stage of their design, using PC. The known methods of parametric identification have low accuracy and usually require transformation of the obtained equations into transfer functions or into systems of differential equations of the first order for greater convenience of their use. The purpose of the work was to determine, by graphic representation of the acceleration curve of a three-capacity object, all parameters of the dynamical model with maximum accuracy. The article describes the order of graphic processing of the acceleration curve with the designation of characteristic parameters and presents the algorithm for parametric identification of mathematical models of dynamics of three-capacity objects. The proposed calculation method is the determination of the stable time T_1 , T_2 and T_3 of three-capacity objects using ideal acceleration curves, which are united by the sum of the ordinates of characteristic points in three separate groups, which also made it possible to significantly increase the accuracy of parametric identification. The proposed method for identifying the parameters of dynamics models of three-capacity objects gives the opportunity to accurately determine the sum S of all constant time of ideal acceleration curves. When identifying the parameters of real-time object dynamics models, it is suggested to search for the point of overlap by the magnitude and sign of the $\Delta T'_2$ difference, adjusting the input data and conducting several repeated calculations until the difference $\Delta T'_2$ reaches the established minimum value.

Keywords: parametric identification, three-capacity object, acceleration curve, time constant, dynamic characteristic, object of regulation.

PREFERENCES

1. Karabutov N.N. *Adaptivnaya identifikatsiya sistem: informatsionnyy sintez* [Adaptive identification of systems: information synthesis]. Moscow: ComKniga, 2006. 384 p. (in Russian).
2. Dubovoy V.M., Kabachiy V.V., Panochishin Yu.M. *Kontrol ta keruvannya v merezhah teplopostachannya: monografiya* [Control of control in the dimensions of heat supply: monograph]. Vinnitsa: UNIVERSUM-Vinnitsa, 2005. 190 p. (in Ukrainian).
3. Perov V.L. *Osnovy teorii avtomaticheskogo regulirovaniya khimiko-tekhnologicheskikh protsessov* [Fundamentals of the theory of automatic regulation of chemical-technological processes]. Moscow: Chemistry, 1970. 351 p. (in Russian).
4. Blonskii S.D., Shut O.F., Levchuk I.L. *Vyznachennya parametriv dynamichnykh kharakterystyk dvoymnisnykh obyektiv keruvannya* [Determination of the parameters of the dynamic characteristics of two-element control objects]. *Quest. chemistry and chemistry technology*. 2006. no. 4. pp. 208-210. (in Ukrainian).
5. Petrovas A., Rinkeviciene R. *Automatic Control Theory I, II: A Laboratory Manual*. Vilnius: Technika, 2012. 98 p.
6. Kravtsov A.F., Zaitseva E.V., Chuiko Yu.N. *Raschet avtomaticheskikh sistem kontrolya i regulirovaniya metallurgicheskikh protsessov* [Calculation of automatic control systems and regulation of metallurgical processes]. Kiiv: Higher School, 1981. 320 p. (in Russian).
7. Dubovoy V.M. *Identifikatsiya ta modelyuvannya tekhnologichnykh obyektiv i system keruvannya: navchalnyy posibnyk* [Identification and modeling of technological objects and control systems: textbook]. Vinnitsa: VNTU, 2012. 308 p. (in Ukrainian).

УДК 519.8

Ус С.А.^а, Станіна О.Д.^б**АЛГОРИТМ РОЗВ'ЯЗАННЯ ОДНІЄЇ ЗАДАЧІ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗБИТТЯ МНОЖИН З ДОДАТКОВИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ**^а ДВНЗ «Національний гірничий університет», м. Дніпро, Україна^б ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, Україна

Задачі розміщення виробництва активно досліджуються протягом більше ніж ста років, але до цього часу вони не втратили своєї актуальності. Наприклад, хоча запропонована велика кількість моделей і методів розв'язування дискретних задач розміщення, практично не має досліджень континуальних задач. В той же час розвиток виробництва потребує вирішення цілої низки проблем, які описуються саме такими моделями. Серед них задачі розміщення багатоетапного виробництва з метою мінімізації сумарної вартості доставки продукції та сировини і забезпечення покриття певної зони обслуговування. Тут вихідна множина неперервна за своєю природою, а існуючі дискретні моделі потребують великої кількості спрощень, які негативно впливають на кінцевий результат. В статті розглянуто задачу оптимального розбиття множин із додатковими зв'язками та розміщенням центрів підмножин, яка є математичною моделлю двохетапної континуальної задачі розміщення-розподілу. Складність дослідження полягає в тому, що математична модель включає в себе як дискретну так і неперервну частини, а тому вимагає комбінованих методів розв'язку. Необхідність розробки таких алгоритмів безперечна, оскільки за подібними моделями описують цілу низку практично важливих задач, зокрема задачі розміщення пунктів збору та переробки природної сировини. Крім того, розглянута задача є розвитком теорії оптимального розбиття множин, і тому має також теоретичне значення. Особлива увага була звернута до підходу до розв'язку цієї задачі. Він полягає в перетворенні вихідної задачі в задачу нескінченновимірного математичного програмування через введення характеристичних функцій, а потім в задачу скінченновимірної оптимізації за допомогою функції Лагранжа. Надано алгоритм розв'язування задачі оптимального розбиття множин з додатковими зв'язками. Він може мати цінність як з точки зору практичного застосування для розв'язування прикладних задач, так і з точки зору подальшого розвитку теорії оптимального розбиття множин.

Ключові слова: задачі розміщення-розподілу, оптимізація, задачі оптимального розбиття множин, багатоетапні задачі, математичні моделі.

Постановка проблеми

Задача оптимального розміщення об'єктів в заданій області — одна з найбільш актуальних і активно досліджуваних проблем в області дослідження операцій. Її вивченню присвячена велика кількість робіт і наразі сформульовані різні класи і типи таких задач. Однак, в більшості своїй вони присвячені дослідженню дискретних задач, або зведенню до них. В той же час дослідження задач розміщення-розподілу у яких множина можливих місць розміщення об'єктів і споживачів є континуальними майже не проводилися.

В даній роботі досліджується багатоетапна задача розміщення підприємств, в якій множина можливих місць розміщення підприємств одного з етапів континуальна, а множина можливих місць розміщення підприємств іншого етапу — дискретна.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Велику кількість вітчизняних і зарубіжних публікацій було присвячено вивченню дискретних і неперервних задач розміщення. Огляд математичних моделей і підходів до розв'язання таких задач, можна побачити в L. Cooper, Z. Drezner [1,2]. Також, такі задачі досліджува-

лися у роботах В.А. Трубіна [3].

Слід зауважити, що окремі дискретні задачі розміщення на сьогоднішній день вже досить добре вивчені, в той час як неперервні задачі розміщення вимагають подальшого вивчення і розширення, оскільки крім практичної користі, також дозволяють отримати теоретично обґрунтований розв'язок деяких класів прикладних задач.

На сьогоднішній день у зв'язку з розвитком електронно-обчислювальної техніки і появи нових джерел статистичних даних, а також систем їх візуалізації, з'являється можливість побудувати більш складні моделі задач розміщення-розподілу, які охоплюють широке коло реальних задач. І ця ситуація вимагає подальшого розвитку теорії задач розміщення-розподілу.

В даний час одним з напрямків досліджень, які активно розвиваються, є неперервні задачі оптимального розбиття множин (ОРМ). Вперше, вони були сформульовані у 60-х роках ХХ сторіччя в роботах Н.В. Corley та S.D. Roberts, Е.М. Кисельової та І.В. Бейко. Зараз дослідження в даному напрямі активно ведуться науковою школою О.М. Кисельової [4,5]. Ці дослідження стосуються подальшого узагальнення теорії ОРМ та розповсюдження її на нові класи задач. Одним із таких напрямів є неперервні задачі ОРМ при наявності додаткових зв'язків та попередньо невідомого розміщення центру підмножин.

Окремо необхідно відзначити перспективність розгляду багатоетапних задач розміщення підприємств з неперервно-розподіленим ресурсом, як різновид неперервних задач ОРМ. Серед авторів, що займалися дискретними багатоетапними задачами, слід відзначити В.Л. Береснева, Е.Х. Гімаді, Ю.А. Кочетова, В.А. Трубіна, Д.Б. Юдіна [3,6] та інших.

Формулювання цілей дослідження

Метою даної роботи є створення алгоритму розв'язання задачі оптимального розбиття множин з додатковими зв'язками, як різновиду нескінченномірної багатоетапної задачі розміщення.

Викладення основного матеріалу дослідження

Змістовну постановку задачі оптимального розбиття множин з додатковими зв'язками (ОРМДЗ) можна сформулювати у такий спосіб. Припустимо маємо деяке виробництво, що пов'язане з суб'єктами, які отримують сировину від постачальників неперервно розподілених в області, переробляють його і відправляють для реалізації (або подальшої переробки) в пункти,

розташування яких заздалегідь відомо. Пункти, що переробляють сировину, будемо називати пунктами первинного перероблення або підприємствами першого етапу, а пункти подальшого перероблення – подальшого перероблення або підприємствами другого етапу. Припустимо також, що відомо: попит b_j^{II} на продукцію для підприємствами другого етапу, $j=1,2,\dots,M$; запас $c(x)$ ресурсу в кожній точці області Ω ; вартість доставки одиниці ресурсу, $i=1,2,\dots,N$ – з точки x в пункт первинного перероблення τ_i^{I} ; вартість перевезення одиниці продукту $c_{ij}^{\text{II}}(\tau_i^{\text{I}}, \tau_j^{\text{II}})$ з пункту первинного перероблення τ_i^{I} в пункт τ_j^{II} .

Відзначимо, що кожен постачальник сировини $x \in \Omega$ пов'язаний тільки з одним підприємством першого етапу, $i=1,2,\dots,N$, який в свою чергу може бути пов'язаний з одним або декількома підприємствами другого етапу, $j=1,2,\dots,M$.

Необхідно розмістити підприємства першого етапу, визначити зони обслуговування для кожного з них та обсяги перевезень між підприємствами першого та другого етапів таким чином, щоб забезпечити мінімальну сумарну вартість доставки сировини і кінцевої продукції.

Для формування математичних постановок названої та наступних двоетапних задач ОРМДЗ введемо такі позначення: Ω – область, в якій розміщується підприємства; N – необхідна кількість підприємств I етапу; M – кількість підприємств II-го етапу; b_j^{II} – потужність j -го

підприємства II-го етапу; $c_i^{\text{I}}(x, \tau_i^{\text{I}})$ – вартість доставки одиниці сировини з точки $x \in \Omega$ до i -го

підприємства I етапу; $c_{ij}^{\text{II}}(\tau_i^{\text{I}}, \tau_j^{\text{II}})$ – вартість доставки одиниці сировини від i -го підприємства I етапу до j -го підприємства II етапу; $\rho(x)$ – кількість ресурсу в точці x області Ω ;

$\tau_i^{\text{r}} = (\tau_{i1}^{\text{r}}, \tau_{i2}^{\text{r}})$ – координати i -го підприємства i -го етапу; v_{ij} – обсяг продукції, що постачається від i -го підприємства I етапу до j -му підприємству II етапу.

Нехай Ω – замкнута, обмежена, опукла, вимірна за Лебегом множина евклідового простору E^n . Введемо до розгляду множину всіх можливих розбиттів множини Ω на N підмножин, що не перетинаються:

$$\sum_{\Omega}^N = \left\{ (\Omega_1, \dots, \Omega_N) : \bigcup_{i=1}^N \Omega_i = \Omega, (\Omega_i \cap \Omega_j) = \emptyset, \begin{matrix} i \neq j, i, j = 1, \dots, N \end{matrix} \right\}.$$

Тоді математична модель задачі ОРМДЗ може бути записана у такий спосіб:

Задача А. Потрібно знайти таке розбиття множини Ω на N вимірних по Лебегу підмножин $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_N$ (серед яких можуть бути й порожні), визначити координати $\tau_1^I, \dots, \tau_N^I$ центрів цих підмножин та такі обсяги перевезень $v_{11}, \dots, v_{NM}$, які забезпечують мінімум функціоналу:

$$F(\{\Omega_1, \dots, \Omega_N\}, \{\tau_1^I, \dots, \tau_N^I\}, \{v_{11}, \dots, v_{NM}\}) = \sum_{i=1}^N \int_{\Omega_i} c_i^I(x, \tau_i^I) \rho(x) dx + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_{ij}^{II}(\tau_i^I, \tau_j^{II}) v_{ij}, \quad (1)$$

при обмеженнях:

$$\int_{\Omega_i} \rho(x) dx = \sum_{j=1}^M v_{ij}, \quad i=1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} = b_j^{II}, \quad j=1, 2, \dots, M, \quad (3)$$

$$\{\Omega_1, \dots, \Omega_N\} \in \sum_{\Omega}^N,$$

$$v_{ij} \geq 0, \quad i=1, 2, \dots, N, \quad j=1, 2, \dots, M,$$

$$\tau^I = (\tau_1^I, \tau_2^I, \dots, \tau_N^I), \quad \tau^I \in \Omega^N. \quad (4)$$

Тут $x = (x^{(1)}, \dots, x^{(n)}) \in \Omega$; b_j^{II} , $j=1, 2, \dots, M$ – задані дійсні невід'ємні числа.

Функції $c_i^I(x, \tau_i^I)$, $i=1, 2, \dots, N$ – дійсні, обмежені, вимірні з аргументу x на Ω , та опуклі з τ на Ω для всіх; $\rho(x)$ – дійсна функція, що інтегрується і визначена на множині Ω ; τ_j^{II} , $j=1, 2, \dots, M$ – задані точки області Ω , $c_{ij}^{II}(\tau_i^I, \tau_j^{II})$, $i=1, 2, \dots, N$, $j=1, 2, \dots, M$ – задані дійсні, обмежені невід'ємні функції.

Тут обмеження (2)–(3) описують баланс між потужностями підприємств першого та другого етапів, отже мають бути виконані умови розв'язності задачі, а саме:

$$\sum_{j=1}^M b_j^{II} = \int_{\Omega} \rho(x) dx.$$

Опишемо алгоритм розв'язку задачі А, заснований на єдиному підході до вирішення подібних задач. Він полягає в перетворенні вихідних задач в задачі нескінченновимірною математичного програмування, за допомогою характерис-

тичних функцій, а потім в скінченномірну задачу оптимізації за допомогою функціоналу Лагранжа.

Для цього розглянемо таку розширену функцію:

$$G(\tau, v, \psi, \eta) = \int_{\Omega} \min_{k=1, N} (c_k^I(x, \tau_k^I) + \psi_i) \rho(x) dx + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (c_{ij}^{II}(\tau_i^I, \tau_j^{II}) + \eta_j - \psi_i) v_{ij} - \sum_{j=1}^M b_j^{II} \eta_j + D \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \max^2(0; -v_{ij}) + D \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \max^2(0; \psi_i + \eta_j - c_{ij}^{II}(\tau_i^I, \tau_j^{II})),$$

де D – досить велике додатне число.

Крок 0.

1. Область Ω заключаємо в паралелепіпед P , сторони якого паралельні осям декартової системи координат, вважаємо $\rho(x)=0$, при $x \in P \setminus \Omega$. Паралелепіпед P покриваємо прямокутної сіткою і задаємо початкове наближення $(\tau^I, \psi) = (\tau^{I(0)}, \psi^{(0)})$ та $(v, \eta) = (v_0, \eta_0)$.

2. Обчислюємо значення $\lambda^{(0)}(x)$ в вузлах сітки наступним чином:

$$\lambda_i(x) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } c_i^I(x, \tau_i^I) + \psi_i = \\ \min_k (c_k^I(x, \tau_k^I) + \psi_i), & \\ 0, & \text{в інших випадках,} \end{cases} \quad (5)$$

при $\tau^I = \tau^{I(0)}$, $\psi = \psi^{(0)}$.

3. Обчислюємо значення градієнтів в вузлах сітки за формулами:

$$g^{\tau} = \int_{\Omega} \rho(x) g_{c_i^I}^{\tau_i^I} \lambda_i(x) dx + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M g_{c_{ij}^{II}}^{\tau_i^I} v_{ij} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M 2D \max(0; \psi_i + \eta_j - c_{ij}^{II}(\tau_i^I, \tau_j^{II})), \quad (6)$$

$$g^{\psi} = \int_{\Omega} \rho(x) \lambda_i(x) dx - \sum_{j=1}^M v_{ij} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M 2D \max(0; \psi_i + \eta_j - c_{ij}^{II}(\tau_i^I, \tau_j^{II})), \quad (7)$$

де g^{τ^0} – i -а компонента N -мірного вектора узгальненого градієнта g_i^{τ} функції c_i^I в точці τ^I , g^{τ^0} – i -а компонента N -мірного вектора узгальненого градієнта $g_{c_i^I}$ функції c_{ij}^{II} в точці τ^I .

$$g^n = \sum_{i=1}^N v_{ij} - b_j^{II} + \sum_{j=1}^M 2D \max(0; \psi_i + \eta_j), \quad (8)$$

$$g^v = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_{ij}(\tau_i^I, \tau_j^{II}) - \eta_j + \psi_i - 2D \max(0; -v_{ij}), \quad (9)$$

при $\tau^I = \tau^{I(0)}$, $\lambda = \lambda^{(0)}$, $l = l^{(0)}$, $v = v^{(0)}$, $\eta = \eta^{(0)}$.

4. Обираємо початковий пробний крок $h_0 > 0$ g -алгоритму і знаходимо:

$$\tau^{I(0)} = P_{\Pi} \left(\tau^{I(0)} - h_0 g^{\tau}(\tau^{I(0)}, \psi^{(0)}, \eta^{(0)}, v^{(0)}) \right);$$

$$\psi^{I(0)} = \psi^{I(0)} + h_0 g^{\psi}(\tau^{I(0)}, \psi^{(0)}, \eta^{(0)}, v^{(0)});$$

$$\eta^{I(0)} = \eta^{I(0)} + h_0 g^{\eta}(\tau^{I(0)}, \psi^{(0)}, \eta^{(0)}, v^{(0)});$$

$$v^{I(0)} = v^{I(0)} + h_0 g^v(\tau^{I(0)}, \psi^{(0)}, \eta^{(0)}, v^{(0)}),$$

де P_{Π} – оператор проектування на Ω .

Нехай вже проведено $l = (l-1)$ крок алгоритму, опишемо l -ий крок.

Крок l .

1. Обчислюємо значення $\lambda^{(l)}(x)$ в вузлах сітки за формулою (5).

2. Обчислюємо значення градієнтів в вузлах сітки за формулами (6)–(9) при $\tau^l = \tau^{I(l-1)}$, $\psi = \psi^{I(l-1)}$, $\lambda = \lambda^{(l-1)}$, $v = v^{(l-1)}$, $\eta = \eta^{(l-1)}$.

3. Проводимо l -ий крок g -алгоритму і знаходимо:

$$\tau^{I(l)} = P_{\Pi} \left(\tau^{I(l)} - h_{l-1} g^{\tau}(\tau^{I(l-1)}, \psi^{(l-1)}, \eta^{(l-1)}, v^{(l-1)}) \right);$$

$$\psi^{I(l)} = \psi^{I(l-1)} + h_{l-1} g^{\psi}(\tau^{I(l-1)}, \psi^{(l-1)}, \eta^{(l-1)}, v^{(l-1)});$$

$$\eta^{I(l)} = \eta^{I(l-1)} + h_{l-1} g^{\eta}(\tau^{I(l-1)}, \psi^{(l-1)}, \eta^{(l-1)}, v^{(l-1)});$$

$$v^{I(l)} = v^{I(l-1)} + h_{l-1} g^v(\tau^{I(l-1)}, \psi^{(l-1)}, \eta^{(l-1)}, v^{(l-1)}),$$

де h_l – кроковий множник, вибір якого здійснюється з умови мінімуму у напрямку B_l^{τ} , B_l^{ψ} , B_l^{η} , B_l^v – оператори перетворення простору в основний простір E_N , що мають вигляд:

$$B_l^w = B_{l-1}^w \left(I + \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right) \theta_{l-1}^w (\theta_{l-1}^w)^T \right),$$

де w – відповідна змінна, I – одинична матриця відповідної розмірності, θ_{l-1}^w – відповідає нормованому вектору різниці двох послідовних псевдоградієнтів в перетвореному просторі, тобто:

$$\theta_{l-1}^w = \frac{(B_{l-1}^w)^T \begin{pmatrix} g_P^w(\tau^{(l)}, \psi^{(l)}, \eta^{(l)}, v^{(l)}) - \\ -g_P^w(\tau^{(l-1)}, \psi^{(l-1)}, \eta^{(l-1)}, v^{(l-1)}) \end{pmatrix}}{\left\| (B_{l-1}^w)^T \begin{pmatrix} g_P^w(\tau^{(l)}, \psi^{(l)}, \eta^{(l)}, v^{(l)}) - \\ -g_P^w(\tau^{(l-1)}, \psi^{(l-1)}, \eta^{(l-1)}, v^{(l-1)}) \end{pmatrix} \right\|},$$

за умови, що

$$\left\| (B_{l-1}^w)^T \begin{pmatrix} g_P^w(\tau^{(l)}, \psi^{(l)}, \eta^{(l)}, v^{(l)}) - \\ -g_P^w(\tau^{(l-1)}, \psi^{(l-1)}, \eta^{(l-1)}, v^{(l-1)}) \end{pmatrix} \right\| \geq \varepsilon_0, \text{ та}$$

$\theta_{l-1}^w = 0$ в інших випадках. Тут ε_0 – точність надання нуля ЕОМ.

4. Якщо умова

$$\left\| \begin{pmatrix} \tau^{(l)}, \psi^{(l)}, \eta^{(l)}, v^{(l)} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \tau^{(l-1)}, \psi^{(l-1)}, \eta^{(l-1)}, v^{(l-1)} \end{pmatrix} \right\| \leq \varepsilon \text{ а, } \varepsilon > 0 \text{ вико-}$$

нується, то кінець алгоритму, якщо ні – повертаємося до кроку 1.

Висновки

Проблеми розміщення підприємств є сприятливим підґрунтям для розвитку нових методів моделювання, інноваційних алгоритмів розв'язку і цікавих додатків. На сьогодні практично немає досліджень нескінченномірних багатоетапних задач розміщення через їх складність. В даній роботі запропоновано алгоритм розв'язання таких задач, який може мати цінність як з точки зору практичної значущості для вирішення прикладних задач, так і з точки зору подальшого розвитку теоретичних питань.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Drezner, Z., Hamacher H.W. Facility location. Application and Theory – Springer, 2004. – 457 p.
2. Farahani R.Z., Hekmatfar M. Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies – Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009. – p.549.
3. Trubin V.A., Sharifov F.A. Simple multistage location problem on a treelike network // Cybernetics and Systems Analysis. November–December 1992. – Vol. 28. – Is. 6. – p.912-917.
4. Киселева Е.М., Шор Н.З. Непрерывные задачи оптимального разбиения множеств: теория, алгоритмы, приложения: Монография – К.: Наукова думка, 2005. – 564 с.
5. Киселева Е.М., Коряшкина Л.С., Ус С.А. Теория оптимального разбиения множеств в задачах распознавания образов, анализа и идентификации систем. – Д.: НГУ, 2015. – 270 с.
6. Кочетов Ю.А., Панин А.А., Плясунов А.В. Сравнение метаэвристик для решения двухуровневой задачи размещения предприятий и фабричного ценообразования // Дискретн. анализ и исслед. Опер. – 2015. – Т. 22. – № 3. – С.36-54.

Надійшла до редакції 14.10.2017

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ОДНОЙ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗБИЕНИЯ МНОЖЕСТВ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ СВЯЗЯМИ

Ус С.А., Станина О.Д.

Задачи размещения производства активно исследуются в течение более чем ста лет, но до настоящего времени они не потеряли своей актуальности. Например, хотя предложено большое количество моделей и методов решения дискретных задач размещения, практически нет исследований континуальных задач. В то же время развитие требует решения целого ряда проблем, которые описываются именно такими моделями. Среди них задачи размещения многоэтапного производства с целью минимизации суммарной стоимости доставки продукции и сырья и обеспечения покрытия определенной зоны обслуживания. Здесь исходное множество непрерывно по своей природе, а существующие дискретные модели требуют большого количества упрощений, которые негативно влияют на конечный результат. В статье рассмотрена задача оптимального разбиения множеств с дополнительными связями и размещением центров подмножеств, которая является математической моделью двухэтапной континуальной задачи размещения-распределения. Сложность исследования заключается в том, что математическая модель включает в себя как дискретную так и непрерывную части, а потому требует комбинированных методов решения. Необходимость разработки таких алгоритмов бесспорна, поскольку подобными моделями описывают целый ряд практически важных задач, в частности задачи размещения пунктов сбора и переработки природного сырья. Кроме того, рассмотренная задача развивает теорию

оптимального разбиения множеств, и поэтому имеет также теоретическое значение. Особое внимание было уделено подходу к решению этой задачи. Он заключается в преобразовании исходной задачи в задачу бесконечномерного математического программирования через введение характеристических функций, а затем в задачу конечномерной оптимизации с помощью функции Лагранжа. Представлен алгоритм решения задачи оптимального разбиения множеств с дополнительными связями. Он может иметь ценность как с точки зрения практического применения для решения прикладных задач, так и с точки зрения дальнейшего развития теории оптимального разбиения множеств.

Ключевые слова: задачи размещения-распределения, оптимизация, задачи оптимального разбиения множеств, многоэтапные задачи, математические модели.

ALGORITHM TO SOLVE A PROBLEM OF OPTIMUM SEPARATION OF SETS WITH ADDITIONAL COUPLINGS

Us S.A., Stanina O.D.

^a National Mining University, Dnipro, Ukraine

^b Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

Problems of manufacturing arrangement have been considered for more than a century. However, they are still topical. For instance, despite the fact that a number of models and techniques to solve discrete problems of arrangement have been proposed, studies concerning continual problems are not practically available. At the same time, production development involves solution of a variety of problems which are described with the help of such models. Problems of multistage production to minimize total cost of product delivery and raw material as well as to provide coverage of a certain service area are among them. In this context, original set is continuous by its nature, and available discrete models need a great number of simplifications being detrimental to the final result. The paper considers a problem of optimum separation of sets with additional connections and arrangement of centres of subsets, which is a mathematical model of two-stage continual location-allocation problem. Complexity of the studies is that a mathematical model involves both discrete part and continual one thus requiring combined solution techniques. The necessity to develop such algorithms is undisputable since such models describe a number of important practical problems including those concerning the arrangement of points for natural raw material accumulating and processing. Moreover, the considered problem develops the theory of optimum separation of sets, and so it is important in terms of theory as well. Specific attention has been paid to the approach for the problem solving. The approach is to transform the original problem into a problem of infinite-dimensional mathematical programming and then into a problem of finite-dimensional optimization with the help of Lagrange function. Algorithm to solve a problem of optimum separation of sets with additional connections has been represented. The algorithm may be important from the viewpoint of its application to solve applied problems as well as from the viewpoint of further development of the theory of optimum separation of sets.

Keywords: location-allocation problem, optimization, optimal partitioning sets problem, multi-stage problem, mathematical models.

REFERENCES

1. Drezner Z., Hamacher H.W. *Facility location. Application and Theory*, Springer, 2004, 457 p.
2. Farahani R.Z., Hekmatfar M. *Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009. 549 p.
3. Trubin V.A., Sharifov F.A. *Simple multistage location problem on a treelike network*, Cybernetics and Systems Analysis. November-December, 1992, vol. 28, Issue 6, pp. 912-917.
4. Kiseliova E.M., Shor N.Z. *Nepreryvnye zadachi optimal'nogo razbienia mnozhestv: teoriya, algoritmy, prilozheniya: Monografiya* [Continuous problems of optimum set separation: theory, algorithms, applications: Monograph], K.: Naukova dumka, 2005, 564 p. (in Russian).
5. Kiseliova E.M., Koriashkina L.S., Us S.A. *Teoriya optimal'nogo razbienia mnozhestv v zadachah raspoznavaniya obrazov, analiza i identifikacii sistem* [Theory of optimum set separation in the problems of image identification, analysis, and identification of systems] Ministry of education and science of Ukraine; National Mining University, D.: NMU, 2015, 270 p. (in Russian).
6. Kochetov Yu.A., Panin A.A., Plyasunov A.V. *Sravnenie metajevristik dlja resheniya dvuhurovnevoj zadachi razmeshheniya predpriyatij i fabrichnogo cenoobrazovaniya* [Comparison of metaheuristics for the bilevel facility location and mill pricing problem], Diskretn. Anal. Issled. Oper., 2015, vol. 22, Issue 3, pp. 36-54. (in Russian).

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

АКБУЛУТ Метін – викладач Університету Ейлула (Бандирма, Туреччина)

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

БОРЗОВ Сергій Олексійович – к.т.н., доцент кафедри вищої математики ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

ГАВРИЛКО Аліна Вікторівна – асистент кафедри енергетики ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

ГАРМАШЕВ Денис Юрійович – кандидат технічних наук, керівник напрямку виробництва безшовних труб, ТОВ «ІНТЕРПАЙП Україна» (м. Дніпро, Україна)

ГАШИМОВ Расім Гумбат огли – старший викладач кафедри загальної та прикладної математики Азербайджанського технічного університету (м. Баку, Азербайджан)

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

ГУСЕЙНОВ Натіг Етибар огли – к.т.н., доцент кафедри загальної та прикладної математики Азербайджанського технічного університету (м. Баку, Азербайджан)

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

ДИСКОВСЬКИЙ Олександр Андрійович – д.т.н., професор кафедри вищої математики Національної металургійної академії України (м. Дніпро, Україна)

ДОНЕЦЬ Дмитро Андрійович – провідний інженер, ТОВ «ІНТЕРПАЙП Ніко Тьюб» (м. Нікополь, Україна)

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

ІВАНОВА Євгенія Олександрівна – студентка кафедри інформаційних систем ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

КОЛОМІЄЦЬ Олена Вікторівна – к.т.н., асистент кафедри енергетики 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)

КОСОЛАП Анатолій Іванович – д.ф.-м.н., професор, завідувач кафедрою спеціалізованих комп'ютерних систем ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

ЛЯШЕНКО Оксана Анатоліївна – к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних систем ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

МАЛА Юлія Анатоліївна — к.т.н., асистент кафедри вищої математики Національної металургійної академії України (м. Дніпро, Україна)

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

МАНУКЯН Артур Аждаакович — магістр кафедри інформаційних технологій і систем Національної металургійної академії України (м. Дніпро, Україна)

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

МУСАЄВ Відаді Гасан огли — д.т.н., професор, завідувач кафедрою комп'ютерних систем та мереж Азербайджанського технічного університету (м. Баку, Азербайджан)

ОКУЯН Кемаль — професор Університету Баликесір (Баликесір, Туреччина)

ПЕТРЕНКО Катерина Миколаївна — студентка спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» факультету комп'ютерних наук та інженерії ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

ПРОКОПЕНКО Олена Михайлівна — к.х.н., доцент, доцент кафедри екології Національної металургійної академії України (м. Дніпро, Україна)

РАХМАНОВ Сулейман Рахманович — к.т.н., доцент, доцент кафедри теоретичної механіки та опору матеріалів Національної металургійної академії України (м. Дніпро, Україна)

СЕЛІВЬОРСТОВА Тетяна Віталіївна — к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних технологій і систем Національної металургійної академії України (м. Дніпро, Україна)

СТАНІНА Ольга Дмитрівна — асистент кафедри інформаційних систем ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

СТЕПАНЕНКО Олександр Миколайович — головний інженер державного підприємства УкрГіпромез (м. Дніпро, Україна)

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

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

УС Світлана Альбертівна — к.ф.-м.н., професор кафедри системного аналізу і управління Національного гірничого університету (м. Дніпро, Україна)

ШУТЬ Олександр Феліксович — асистент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та метрології ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК		ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ		NAME INDEX	
АКБУЛУТ М.	4	АКБУЛУТ М.	4	AKBULUT M.	4
БЕЛЯНОВСЬКА О.А.	72	БЕЛЯНОВСКАЯ Е.А.	72	BELYANOVSKAYA E.A	72
БОРЗОВ С.О.	14	БОРЗОВ С.А.	14	BORZOV S.A.	14
ГАВРИЛКО А.В.	72	ГАВРИЛКО А.В.	72	DENYSIUK O.R.	14
ГАРМАШЕВ Д.Ю.	65	ГАРМАШЕВ Д.Ю.	65	DISKOVSKIY O.A.	23
ГАШИМОВ Р.Г.	65	ГАШИМОВ Р.Г.	65	DONEC D.A.	65
ГНАТКО О.М.	77	ГНАТКО Е.Н.	77	GARMASHEV D.Yu.	65
ГУСЕЙНОВ Н.Е.	9	ГУСЕЙНОВ Н.Е.	9	GAVRLKO A.V.	72
ДЕНИСЮК О.Р.	14	ДЕНИСЮК О.Р.	14	GNATKO O.M.	77
ДИСКОВСЬКИЙ О.А.	23	ДИСКОВСКИЙ А.А.	23	HASHIMOV R.H.	9
ДОНЕЦЬ Д.А.	65	ДОНЕЦ Д.А.	65	HUSEYNOV N.E.	9
ЗЕЛЕНЦОВ Д.Г.	28	ЗЕЛЕНЦОВ Д.Г.	28	IVANOVA E.A.	35
ІВАНОВА Є.О.	35	ИВАНОВА Е.А.	35	KOLOMIYETS E.V.	72
КОЛОМІЄЦЬ О.В.	72	КОЛОМИЕЦ Е.В.	72	KOROTKA L.I.	35
КОРОТКА Л.І.	35	КОРОТКАЯ Л.И.	35	KOSOLAP A.I.	42
КОСОЛАП А.І.	42	КОСОЛАП А.И.	42	LIASHENKO O.A.	28
ЛЯШЕНКО О.А.	28	ЛЯШЕНКО О.А.	28	MALA Yu.A.	23
МАЛА Ю.А.	23	МАЛАЯ Ю.А.	23	MANKO G.I.	59
МАНКО Г.І.	59	МАНКО Г.И.	59	MANUKIAN A.A.	48
МАНУКЯН А.А.	48	МАНУКЯН А.А.	48	MINAKOVA N.O.	77
МІНАКОВА Н.О.	77	МИНАКОВА Н.А.	77	MUSAYEV V.H.	54
МУСАЄВ В.Г.	54	МУСАЕВ В.Г.	54	OKUYAN C.	4
ОКУЯН К.	4	ОКУЯН К.	4	PETRENKO E.N.	59
ПЕТРЕНКО К.М.	59	ПЕТРЕНКО Е.Н.	59	PROKOPENKO O.M.	72
ПРОКОПЕНКО О.М.	72	ПРОКОПЕНКО Е.М.	72	RAHMANOV S.R.	65
РАХМАНОВ С.Р.	65	РАХМАНОВ С.Р.	65	SELIVYORSTOVA T.V.	48
СЕЛІВЬОРСТОВА Т.В.	48	СЕЛИВЁРСТОВА Т.В.	48	SHUT O.F.	77
СТАНІНА О.Д.	83	СТАНИНА О.Д.	83	STANINA O.D.	83
СТЕПАНЕНКО О.М.	65	СТЕПАНЕНКО А.Н.	65	STEPANENKO A.N.	65
СУХИЙ К.М.	72	СУХОЙ К.М.	72	SUKHYI K.M.	72
ТІТОВА О.В.	77	ТИТОВА Е.В.	77	TITOVA O.V.	77
УС С.А.	83	УС С.А.	83	US S.A.	83
ШУТЬ О.Ф.	77	ШУТЬ А.Ф.	77	ZELENTSOV D.G.	28