

НАУКОВІ ВІСТІ

Національного технічного університету України
"Київський політехнічний інститут"

Науково–технічний журнал

№ 5(61)

2008

Започаткований у вересні 1997 року

Редакційна колегія:

Головний редактор
М.З. Згуровський

Заступник головного
редактора
М.Ю. Льченко

Відповідальний секретар
П.П. Маслянко

Члени редколегії –
координатори
наукових напрямків

М.І. Бобир

С.Г. Бунін

В.Ю. Горчаков

І.А. Дичка

О.В. Збруцький

І.В. Недін

Б.В. Новіков

О.М. Новіков

А.В. Праховник

Є.М. Письменний

Д.Ф. Чернега

О.Г. Юрченко

Ю.І. Якименко

Редакційна рада

Адреса редакції:
03056, Київ-56,
проспект Перемоги, 37,
Національний технічний
університет України
"Київський політехнічний
інститут",
Тел. 454-91-23

У номері:

Економіка та організація
виробництва

Електроніка, радіотехніка та
засоби телекомунікацій

Енергетика та нові
енергогенеруючі технології

Інформаційні технології,
системний аналіз та керування

Матеріалознавство
та машинобудування

Проблеми хімії та хімічної
технології

Теоретичні та прикладні
проблеми фізико-математичних
наук

Засновник – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”
Свідоцтво про державну реєстрацію журналу – серія КВ № 2863, видане 26 вересня 1997 року

Рекомендовано Вченою Радою Національного технічного університету України
“Київський політехнічний інститут”, протокол № 11 від 03.11.08 р.

Члени редакційної ради (за галузями науки)

Фізико-математичні науки

<i>Математика</i>	<i>Фізика</i>	<i>Механіка</i>	<i>Інформатика і кібернетика</i>
В.В. Булдігін	В.Г. Бар'яхтар	А.Е. Бабаєв	Ю.М. Данілін
Н.О. Вірченко	Ю.І. Горобець	С.О. Довгий	О.С. Макаренко
А.А. Дороговцев	В.М. Локтев	Я.Ф. Каюк	В.В. Остапенко
М.М. Кухарчук	С.І. Сидоренко	В.В. Матвеев	Н.Д. Панкратова
А.М. Самойленко	А.П. Шпак	Ю.М. Шевченко	В.М. Панін

<i>Хімічні науки</i>	<i>Біологічні науки</i>	<i>Технічні науки</i>	<i>Економічні науки</i>	
О.О. Андрійко	Л.Б. Бондаренко	В.І. Губар	О.А. Павлов	О.Ф. Балацький
І.М. Астрелін	П.І. Гвоздяк	В.С. Коваленко	М.Г. Попович	В.Г. Герасимчук
А.К. Дорош	О.М. Дуган	В.І. Костюк	В.М. Прохоренко	Є.В. Крикавський
Ю.А. Малетін	Л.А. Лившиць	Ю.Ю. Лукач	Н.С. Равська	М.П. Панченко
А.А. Фокін	С.С. Малюта	Г.М. Любчик	В.О. Румбешта	Г.К. Яловий
	В.С. Підгорський	Є.А. Мачуський	В.І. Сенько	
	Ю.М. Сиволап		В.П. Тарасенко	
	С.С. Ставська		Я.К. Трохименко	

Секретар редакції Л.Д. Калько

Редактор В.Г. Мельник

Графічний дизайн Б.В. Валуєнка
Комп'ютерна верстка О.М. Нестеренко

Підписано до друку 04.11.2008. Формат 60×84¹/8. Папір офс. Гарнітура Times.
Спосіб друку – ризографія. Ум. др. арк. 18,60. Обл.-вид. арк. 31,68. Зам. № Тираж 200 прим.

НТУУ “КПІ” ВПІ ВПК “Політехніка”. 03056, Київ, вул. Політехнічна, 14, корп. 15.
Тел./факс (044) 241-68-78

ЗМІСТ

Економіка та організація виробництва

Серебренніков Б.С. Оцінка експортного потенціалу електроенергетики України в контексті концепції сталого розвитку 5

Електроніка, радіотехніка та засоби телекомунікацій

Ніжебецька Ю.Х., Рибін О.І., Шарпан О.Б. Підвищення точності ортогональних перетворень для аналізу лінійних систем 12

Енергетика та нові енергогенеруючі технології

Баранюк О.В., Письменний Є.М., Семеняко О.В. Дослідження структури потоку в міжреберних каналах поверхонь з пластинчасто-розрізним орєбренням методами числового моделювання 19

Безродний М.К., Голіад М.Н., Барабаш П.О., Дейнеко А.І. Визначення локальної по довжині тепловіддачі при конденсації пари R407C в горизонтальній трубі 27

Зіа І., Курач Т.Ю. Аналіз самозапуску асинхронного двигуна при несиметрії напруги в енергосистемі 33

Інформаційні технології, системний аналіз та керування

Ємець О.О., Ємець Ол-ра О. Операції та відношення над нечіткими числами 39

Маслякко П.П., Вознюк А.С., Вознюк С.С. Дослідження засобів і розробка компонентної моделі інформаційно-комунікаційної системи аналізу даних 47

Титенко С.В. Комплекс моделей для побудови Web-системи безперервного навчання 57

Матеріалознавство та машинобудування

Кисла Г.П., Богомол Ю.І., Карасєвська О.П., Криклива І.Ю. Вплив ультразвукової і термічної обробки на структурну досконалість монокристалів LaV₆ ... 67

Павлова О.П. Дослідження механічних напружень у тонкоплівкових композиціях плівка Ta(100–540 нм)/монокристал Si(001) 73

Руденький С.О. Дослідження впливу ультразвукової обробки на процес диспергування оксиду алюмінію та його властивості, одержаного криохімічним способом 78

Сидоренко П.Ю., Рижов Р.М., Золотовський А.О., Болотов Г.П. Визначення параметрів імпульсних електромагнітних дій для керування процесом переносу електродного металу 83

Проблеми хімії та хімічної технології

Барбаш В.А., Трембус І.В., Складанний Д.М. Оптимізація органосольвентних способів одержання солом'яної целюлози 88

Донченко М.І., Редько Р.М., Нагорний О.В., Мотронюк Т.І. Вплив імпульсного струму на електроосадження нікелю із сульфатних електролітів ... 93

Палейчук В.С., Бондаренко С.О. Використання водорозчинних хімічних відходів у технології майоліки 99

Паславська А.П., Сербін В.П., Булана О.В. Гідратаційна активність сумісно розмелених вапняно-вапнякових сумішей 105

Примиська С.О., Безносик Ю.О., Статюха Г.О., Решетіловський В.П. Дослідження і моделювання процесів адсорбції/десорбції оксидів азоту на цеолітах 109

Рудницька Г.А., Каменська Т.А., Реньський І.О. Зв'язок між параметрами рівняння кінетичного компенсаційного ефекту в термодинаміці активації в'язкої течії рідин та структурою розчинів 114

Свідерський В.А., Миронюк О.В. Вплив термодинамічної сумісності розчинника та плівкоутворюючого полімера на захисні властивості лакофарбового покриття 118

Теоретичні та прикладні проблеми фізикоматематичних наук

Заторський Р.А., Литвиненко І.М. Застосування папаперманентів до лінійних рекурентних рівнянь 122

Капустян В.О., Касьянов П.О., Когут О.П. Властивості розв'язків класу параметризованих операторних включень 129

Кухарчук М.М., Яременко М.І. Розв'язність одного класичного лінійного еліптичного диференціального рівняння другого порядку 137

Швець О.Ю., Печерний В.А. Різноманітність сценаріїв переходу до хаосу в детермінованій системі генератор–п'єзокерамічний випромінювач 142

Пам'яті колеги 150

Реферати 151

Автори номера 154

CONTENTS

Economy and organization of production

- Serebrennikov B.S.* The Estimation of Export Potential of Power Engineering of Ukraine in Context of Sustainable Development 5

Electronics, radio engineering and telecommunications

- Nizebetska Yu.Kh., Rybin O.I., Sharpan O.B.* The Increase of the Precision of the Orthogonal Transformations for the Analysis of the Linear Systems 12

Power engineering and new energy generation technologies

- Baranyuk O.V., Pysmennyi Ye.M., Semenyako O.V.* Research of stream structure in the intercostals ducting from the surfaces with plate-cutted finning of numeral design methods 19

- Bezrodny M.K., Goliyad M.N., Barabash P.O., Deyneko A.I.* The Determination of the Local on the Heat Transfer Length at Condensation Vapor R407C in a Horizontal Pipe 27

- Zia I., Kurach T.Yu.* The Analysis of Asynchronous Engine Self-Start at Asymmetry in the System 33

Information technology, system analysis and guidance

- Yemets' Oleg O., Yemets' Oleksandra O.* Operations and Relations on Fuzzy Numbers 39

- Maslyanko P.P., Voznyuk A.S., Voznyuk S.S.* The Research of Means and Development of Component Model of Information-Communication System of Data Analysis 47

- Tytenko S.V.* The Set of Models for Building the On-going Learning Web-system 57

Materials science and machine building

- Kysla G.P., Bogomol I.I., Karasevskaya O.P., Kryklyva I.Yu.* The Influence of Ultrasonic and Heat Treatment on Structural Perfection of LaB₆ Monocrystals ... 67

- Pavlova O.P.* The Investigation of Mechanical Stresses in Ta(100–540 nm) Film/Si(001)Single Crystal thin film compositions 73

- Rudenskiy S.O.* The Study of Ultrasonic Treatment Influence on Dispersion and Properties of Aluminium Oxide by Cryochemical Method 78

- Sidorenko P.Yu., Ryzhov R.M., Zolotovskiy A.O., Bolotov G.P.* Parameters Determination of Impulsive Electromagnetic Actions for the Process Control of Electrode Metal Transfer 83

Problems of chemistry and chemical engineering

- Barbash V.A., Trembus I.V., Skladanny D.M.* Optimization of organosolvent methods for obtaining straw pulp 88

- Donchenko M.I., Redko R.M., Nagornyj O.V., Motronyuk T.I.* The Influence of a Pulse Current on Nickel Electrodeposition from Sulfamate Electrolytes 93

- Paleychuk V.S., Bondarenko S.O.* The Usage of Soluble Chemical Siftings in the Technology of Majolica . 99

- Paslavskaya A.P., Serbin V.P., Bulana O.V.* The Grindability and Hydration Activity of Lime-Limestone Mixtures 105

- Prymyska S.O., Beznosyk Yu.O., Statyukha G.O., Reshetilowski V.P.* Researching and Designing of Processes Adsorption/Desorption of Nitrogen Oxides on the Zeolites 109

- Rudnitskaya A.A., Kamens'ka T.A., Renskii I.O.* Relation between the Parameters of the Compensation Effect Equation in the Activation Thermodynamics of Liquids Viscous Flow and Solution Structure 114

- Svidersky V.A., Myronyuk O.V.* The Influence of Thermodynamical Compatibility of a Solvent and Film Forming Polymer on Protective Ability of Lacquer Coating 118

Theoretical and applied problems of physics and mathematics

- Zatorsky R.A., Lytvynenko I.M.* Applications of Permanents of Linear Recurrent Sequences 122

- Kapustyan V.O., Kasyanov P.O., Kogut O.P.* Solutions Properties for One Class of Parameterized Operator Inclusions 129

- Kukharchuk M.M., Yaremenko M.I.* On Solvability of One Classical Linear Elliptical Differential Second-Order Equation 137

- Shvets O.Yu., Pechernyi V.A.* Variety of Scenarios of Transition to Chaos in Deterministic System Generator–Piezoceramic Transducer 142

- Obituary 150

- Reports 151

- Contributors to the issue 154

ЕКОНОМІКА ТА ОРГАНІЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА

УДК 339.564.4

Б.С. Серебренніков

ОЦІНКА ЕКСПОРТНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ В КОНТЕКСТІ КОНЦЕПЦІЇ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Вступ

В умовах посилення глобалізації розвиток економіки держави все більше визначається міжнародною конкурентоспроможністю на мікро-, мезо- і макрорівні та її експортним потенціалом (ЕП). Однак динаміка зовнішньоторговельного балансу України свідчить про негативні тенденції для національної економіки. Крім того, товарна структура експорту та імпорту України не відповідає інноваційній моделі розвитку економіки, оскільки частка експортованих товарів другого, третього та четвертого технологічних укладів становить близько 70–80 % [1]. Натомість у структурі імпорту переважають (за винятком енергоносіїв) товари вищих технологічних укладів.

Частка експортованої електроенергії (ЕЕ) в загальному обсязі експорту протягом 2001–2007 рр. поступово підвищувалась з 0,4 до 0,9 % за рахунок зростання обсягів експорту як в натуральному, так і в грошовому виразі [1]. Надалі, згідно з Енергетичною стратегією України на період до 2030 р., можна очікувати продовження такої тенденції [2]. Разом з тим, враховуючи постулати концепції сталого розвитку (СР) [3, с. 4], значну увагу, що приділяється їй в “розумних” країнах, істотний вплив енергетики на навколишнє природне середовище (НПС), шляхи розвитку ЕП електроенергетичної галузі України, на наш погляд, доцільно формувати крізь призму даної концепції [4, с. 28].

Деякі техніко-економічні аспекти експортно-імпортних операцій на електроенергетичному ринку (ЕР) розглядалися в [5, с. 227], зокрема, там наведено економічну умову доцільності експорту та імпорту ЕЕ. Проте поза увагою залишається системна оцінка факторів впливу на реалізацію ЕП. В [6, с. 436] досліджуються математичні моделі визначення енергетичної дефіцитності і надлишковості енергосистеми, але недостатньо уваги приділено економічним проблемам експорту ЕЕ, зокрема ціновому фактору. Проблема порівняльного аналізу варіантів технічного забезпечення експорту ЕЕ з України

присвячена публікація [7], де наводяться переваги побудови вставок постійного струму (ВПС) для здійснення експорту в USTE при збереженні синхронної роботи енергосистем України і Росії [7, с. 8]. У праці [8, с. 37] йдеться про можливий ризик економічної недоцільності інвестицій у ВПС в разі реалізації проекту інтеграції України з USTE методом синхронізації енергосистем. У [9, с. 7] наводяться деякі елементи конкурентного механізму експорту ЕЕ, а також частково окреслено аспекти визначення рівня експортних цін. Проблеми конкуренції між Україною і Росією щодо експорту ЕЕ в країни Європи піднімаються в [10, с. 25]. Однак слід сказати, що дискусійний характер комплексу питань, пов'язаних із визначенням напрямів, механізмів розвитку і реалізації ЕП електроенергетики України потребують подальшого дослідження.

Постановка задачі

У даній статті ставляться такі питання теоретичного і практичного характеру, як визначення факторів впливу на реалізацію ЕП, розробка економічної моделі ЕП, знаходження напрямів розвитку та шляхів оптимізації ЕП підприємств електроенергетичної галузі України в контексті концепції сталого розвитку.

Результати дослідження

Показники ЕП. При оцінці ЕП електроенергетики варто розрізняти два його моменти: внутрішній і зовнішній ЕП. Під внутрішнім ЕП будемо розуміти систему техніко-економічних показників галузі, що характеризують обсяг електричної потужності (ЕЛП) і ЕЕ, який може бути експортований із країни протягом певного періоду за умов повного задоволення внутрішніх потреб. Першочергове задоволення внутрішніх потреб є умовою енергетичної і економічної безпеки держави. У свою чергу, внутрішній ЕП доцільно розділяти на максимальний і оптимальний. Оптимальний ЕП електроенергетики пропонується визначати, виходячи із системи критеріїв оптимальності соціально-економічного, екологічного та технічного характеру. Це – цільовий доход/прибуток від експорту; бажана частка ринку в країнах-імпортерах; раціональне споживання вичерпних первинних енергоресурсів; раціональна експлуатація генеруючих і транспортувальних потужностей; мінімізація екстернальних витрат (негативних наслід-

ків для НПС, зниження рівня енергетичної і економічної безпеки тощо) всередині країни; забезпечення певного доцільного резерву генерації ЕЛП і ЕЕ; збалансованість структури експорту ЕЕ за частками країн-імпортерів тощо. Наведений перелік не претендує на вичерпність і може бути розширений та деталізований.

Зовнішній ЕП характеризує обсяг ЕЛП і ЕЕ, який можуть імпортувати потенційні країни-імпортери протягом певного періоду часу, наприклад року, і є похідним від співвідношення попиту та пропозиції ЕЛП і ЕЕ в даних країнах. Динаміку експорту ЕЕ з України в країни Європи і СНД наведено на рис. 1.

Проте варто зазначити, що прогнози щодо зростання виробництва ЕЕ та її експорту протягом 2015–30 рр., наведені в [2], є сумнівними навіть за песимістичним сценарієм, що пояснюється занадто високим рівнем фізичної зношеності основних генеруючих та передавальних фондів [12]. Однією з головних причин цієї проблеми є низький інвестиційний потенціал ЕП відносно необхідного обсягу капіталовкладень у техніко-технологічне оновлення. Існують також певні проблеми, пов'язані з надійним забезпеченням електростанцій паливно-енергетичними ресурсами.

Науковий і практичний інтерес становлять коефіцієнти покриття ЕП електроенергетики України (K_{CEPi}) відносно потенційних країн-імпортерів, які пропонується визначати як співвідношення між внутрішнім (E_{PI}) і зовнішнім (E_{PEi}) ЕП щодо i -ї країни-імпортера: $K_{CEPi} = E_{PI} / E_{PEi}$. Інтегральний коефіцієнт покриття ЕП (K_{CEP}^I) обчислюється за формулою

$$K_{CEP}^I = E_{PI} / \sum_{i=1}^N E_{PEi},$$

де N – кількість країн, яким Україна технічно спроможна експортувати ЕЕ, причому теоретично $K_{CEPi} \in (0; +\infty)$ і $K_{CEP}^I \in (0; +\infty)$. В ситуації, коли $K_{CEP}^I > 1$, відсутня необхідність нарощування внутрішнього ЕП країни, принаймні в коротко- і середньостроковому періодах, а навпаки, існує проблема його реалізації. Коефіцієнт реалізації ЕП електроенергетики України (K_{REP}) відносно країн-імпортерів, пропонується визначати як співвідношення між фактичними обсягами експортованої ЕЕ в країни-імпортери (V_{EE}) та внутрішнім ЕП:

$$K_{REP} = V_{EE} / E_{PI}, \quad K_{REP} \in (0; 1).$$

Фактори впливу на ЕП. Оцінку ЕП варто здійснювати на основі системного підходу, що виявляється у визначенні дерева факторів формування ЕП електроенергетики і встановленні напрямів, характеру і сили їх впливу на результуючий показник та між собою. При цьому вкрай важливо здійснювати оцінку величини ЕП в натуральній та грошовій формах, що пояснюється прагненням країни-експортера головним чином максимізувати надходження та прибуток від експорту ЕЕ, чого можна досягти без збільшення фізичного обсягу експорту, оптимізуючи експортні ціни.

Факторами першого рівня, які впливають на внутрішній ЕП електроенергетики, є: обсяг діючих енергогенеруючих потужностей (ЕГП) P_G ; технічний стан ЕГП T_S ; запаси первинних енергоносіїв на електростанціях S_p ; втрати ЕЕ в ЕГП та лініях електропередач (ЛЕП) L_E ; обсяг внутрішніх потреб в ЕЛП і ЕЕ C_I ; обсяг резерву ЕГП для внутрішніх потреб R_G ; обсяг резерву первинних енергоносіїв для внутрішніх потреб R_p ; норматив накопичення ЕЕ R_S ; пропускну спроможність магістральних ЛЕП C_T .

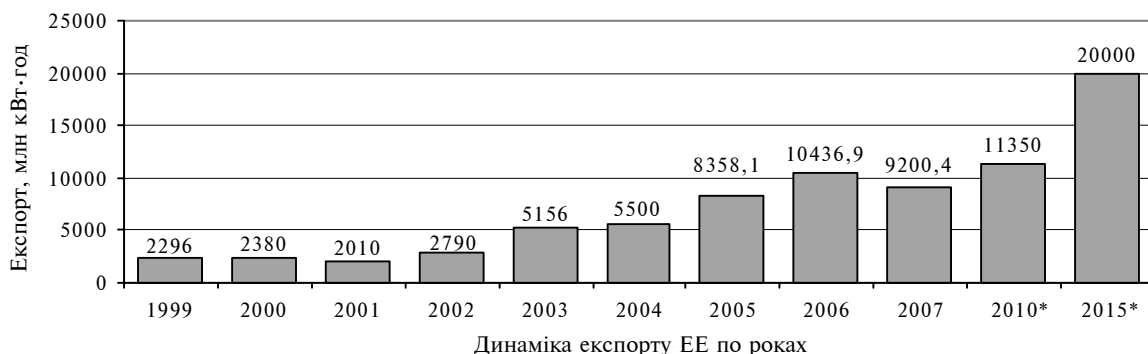


Рис. 1. Динаміка експорту ЕЕ з України [11] (* – прогноз згідно з [2])

Зовнішній ЕП електроенергетики визначається такими факторами, як потреби в ЕЕ країни-імпортера C_E , обсяг виробництва ЕЕ в країні-імпортері G_E , ціна (абсолютна і відносна порівняно з конкурентами) імпортової ЕЕ W_E , ціна на ЕЕ внутрішнього виробництва країни-імпортера W_I , ціни на енергоресурси-замінники ЕЕ W_S , курс національної валюти по відношенню до валют країн-імпортерів ЕЕ R_E , якість ЕЕ Q_E та надійність енергопостачання D_E . На даному етапі будемо абстрагуватись від технічних варіантів і параметрів організації експорту ЕЕ, зокрема фактора частоти в енергосистемі, що може безпосередньо впливати на реалізацію ЕП. Це пояснюється тим, що зараз Україна спроможна експортувати ЕЕ в країни Європи через Бурштинський енергетичний острів, що працює в паралельному режимі з УСТЕ, та країни СНД, зокрема Росію, з енергосистемою якої Україна також працює в паралельному режимі. Крім того, існує принципова можливість використання ВПС. Варто зазначити, що на зовнішній ЕП також впливають геополітичні і гео економічні інтереси (ξ), які трудно піддаються вимірюванню, проте характеризуються істотним впливом на процеси та ефективність зовнішньої торгівлі (наприклад, імовірні економічні конфлікти між Україною і Росією, які є конкурентами в експорті ЕЕ на ринки країн ЄС [10, с. 7; 4, с. 25]); екологічні інтереси країни-імпортера (λ). Також практичний інтерес становить аналіз передумов і ефектів у ситуації, коли країна, яка характеризується надлишковими ЕПП та потенціалом виробництва ЕЕ, виступає її імпортером (наприклад, Польща) або експортером та імпортером одночасно (наприклад, Росія). Наведені фактори можуть бути об'єктами моніторингу з метою забезпечення виваженого керування розвитком та реалізацією ЕП.

Для аналізу ЕП електроенергетики можна використовувати модель, що в узагальненому вигляді може являти собою функціонал множини наведених вище факторів. Аналіз ЕП з метою визначення залежності його вартісного показника від складових функціоналу має два головних етапи: аналіз чутливості до впливу зміни факторів ЕП і оптимізація функціоналу з метою реалізації стратегій розвитку ЕП та пошуку екстремуму, що забезпечує вибрану стратегію. Загальну характеристику впливу факторів на ЕП електроенергетики наведено в табл. 1.

Економічна модель ЕП. Формування адекватної моделі ЕП потребує аналізу значного масиву даних стосовно факторів ЕП, тому в першому наближенні доцільно скористатися спрощеною економічною моделлю. Для цього введемо такі змінні:

- максимально можливий обсяг виробництва ЕП і ЕЕ в енергосистемі країни-експортера $V_G = F(P_G; T_S; S_P; R_G; R_P; R_S)$;

- обсяг дефіциту ЕП і ЕЕ в країнах-імпортерах, який планується покривати імпортом $V_D = F(C_E; G_E; W_E; W_I; W_S; R_E; Q_E; D_E; \xi; \lambda)$;

- коефіцієнт потенційного попиту країн-імпортерів відносно країни-експортера (наприклад, України) k_D , який являє собою співвідношення $k_D = V_D / (V_G - C_I)$, скореговане на коефіцієнт втрат ЕЕ, причому $k_D \in (0; +\infty)$;

- поправковий коефіцієнт реального попиту країн-імпортерів відносно конкретної країни-експортера k_R , причому очевидно, що $k_R \leq (V_G - C_I) / V_D$, скорегованого на коефіцієнт втрат ЕЕ, а $k_D k_R \in (0; 1)$.

Слід зазначити, що достатньо жорстким обмеженням у реалізації ЕП може бути пропускна спроможність магістральних ЛЕП. Разом з тим, враховуючи відносну керованість даним фактором, можна знехтувати ним при оцінці ЕП в середньо- і довгостроковому періодах. Із врахуванням викладеного запишемо спрощену економічну модель внутрішнього ЕП країни-експортера у вигляді функціоналу:

$$E_{PI} = F(V_G; L_E; C_I) = (V_G(I - L_E) - C_I). \quad (1)$$

Внутрішній ЕП, згідно (1), варто розглядати з точки зору максимального і оптимального його значення (наприклад, за запропонованими вище критеріями оптимальності). Зовнішній ЕП корегується із врахуванням k_D і k_R :

$$E_{PE} = (V_G(I - L_E) - C_I)k_D k_R. \quad (2)$$

Внаслідок нескладного математичного перетворення формули (2) за допомогою заміни k_D відповідною розрахунковою формулою отримуємо $E_{PE} = V_D k_R$. Дана особливість зумовлює доцільність аналізу комплексу факторів впливу на k_R , іншими словами, – на реальні обсяги експорту ЕЕ. Враховуючи товарну специфіку ЕЕ, зазначимо, що одним із ключових

Таблиця 1. Вплив факторів на ЕП електроенергетики

Фактор розвитку ЕП	Напрямок зв'язку	Характер зв'язку	Вид зв'язку	Керованість фактора з боку країни-експортера
Внутрішній ЕП				
Обсяг діючих ЕГП	Прямий	Лінійний	Функціональний	Керований у середньо- і довгостроковому періоді
Технічний стан ЕГП	– ” –	–	Стохастичний	Те саме
Запаси первинних енергоносіїв на електростанціях	– ” –	Лінійний	Функціональний	Керований у коротко- і середньостроковому періоді
Втрати ЕЕ в ЕГП і ЛЕП	Зворотний	– ” –	– ” –	Керований у середньо- і довгостроковому періоді
Норматив накопичення ЕЕ	– ” –	– ” –	– ” –	Слабокерований
Обсяги внутрішніх потреб в ЕЛП і ЕЕ	– ” –	– ” –	– ” –	Керований у середньо- та довгостроковому періоді
Обсяг резерву ЕГП	– ” –	– ” –	– ” –	Керований у коротко-, середньо- і довгостроковому періоді
Обсяг резерву первинних енергоносіїв	– ” –	– ” –	– ” –	Керований у коротко- і середньостроковому періоді
Пропускна спроможність магістральних ЛЕП	Прямий	– ” –	– ” –	Керований у середньо- і довгостроковому періоді
Зовнішній ЕП				
Потреби в ЕЕ країни-імпортера	Прямий	–	Стохастичний	Некерований
Обсяг виробництва ЕЕ в країні-імпортері	Зворотний	–	– ” –	– ” –
Ціна імпортової ЕЕ (абсолютна і відносна порівняно з конкурентами)	Зворотний/прямий	–	Стохастичний/Функціональний	Керований
Ціна на ЕЕ внутрішнього виробництва країни-імпортера	Прямий	–	Стохастичний	Некерований
Ціни на енергоресурси-замінники ЕЕ	– ” –	–	– ” –	– ” –
Курс гривні відносно валют країн-імпортерів ЕЕ	Зворотний/прямий	–	Стохастичний/функціональний	Слабокерований
Якість ЕЕ	Прямий	–	Стохастичний	Керований у коротко-, середньо- і довгостроковому періоді
Надійність енергопостачання	– ” –	–	– ” –	Те саме
Геополітичні і геоекономічні інтереси	Зворотний/прямий	–	– ” –	Слабокерований
Екологічні інтереси країни-імпортера	Прямий	–	– ” –	Некерований

інструментів конкуренції на міжнародному ЕП і реалізації ЕП є ціна та цінова політика.

Вартісну оцінку ЕП із врахуванням узгоджених експортних цін на ЕЕ для окремих країн-імпортерів (P_{Ei}) та відповідних часток експорту в країні-імпортери (d_{Ei}) від загального обсягу експорту можна здійснювати за формулою

$$E_{PE} = \sum_{i=1}^N P_{Ei} d_{Ei} ((V_G(1 - L_E) - C_I) k_D k_R). \quad (3)$$

Оперуючи числовими значеннями факторів ЕП і враховуючи тенденції їх зміни, можна оцінити внесок кожної складової та провести процедуру оптимізації, що здійснюється ітераційним методом послідовної апроксимації, яка передбачає зміну параметрів функціоналу, обчислення вихідної реакції E_{PE} та формування цільової функції.

Вплив факторів на розвиток ЕП. Зробимо модельний розрахунок ЕП електроенергетики за формулою (3) за даними роботи Об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України за 2007 р. [11] (табл. 2).

Таблиця 2. Модельний розрахунок ЕП

Показник	Значення ЕЕ
Обсяг виробництва ЕЕ електростанціями, які входять до ОЕС, млрд кВт·год	195,13
Споживання ЕЕ (нетто) галузями національної економіки та населенням, млрд кВт·год	148,34
Загальні втрати ЕЕ	0,1926*
Середня ціна на експортну ЕЕ, дол./кВт·год	0,029**
$k_D k_R$	1***
ЕП електроенергетики України, млн дол.	266,8

Примітка. * – власні розрахунки; ** – середньозважена експортна ціна ЕЕ за 2006 р.; *** – із врахуванням фактичних обсягів експорту ЕЕ за певний період часу (рік); $k_D k_R \rightarrow 1$, що зумовлюється наперед укладеними контрактами на поставку визначених обсягів ЕЛП і ЕЕ та відповідними обсягами їх виробництва в країні-експортері, для виконання договірних зобов'язань.

Разом з тим, ЕП є не статичним, а динамічним показником, кількісні параметри якого залежать від розвитку факторів ЕП. З метою аналізу впливу окремих факторів на показник

ЕП проведемо відповідні розрахунки, послідовно змінюючи значення одного з факторів при незмінних інших та зобразимо їх графічно за допомогою сімейства кривих імовірного розвитку у вигляді приростів ЕП відносно значення 2007 р. (рис. 2). Значення приростів споживання і втрат ЕЕ наведені за модулем, оскільки розглядаються варіанти їх від'ємного приросту.

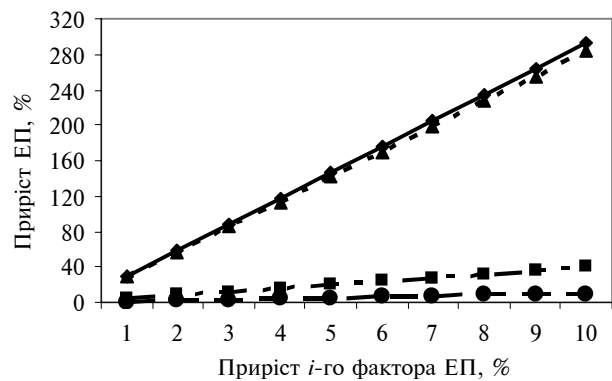


Рис. 2. Вплив зміни факторів на розвиток ЕП: —●— — виробництво; —■— — втрати; —▲— — споживання; —●— — ціна

Як видно з графіка (рис. 2), найбільш суттєво на розширення внутрішнього ЕП електроенергетики впливають нарощування обсягів виробництва ЕЛП і ЕЕ та скорочення обсягів їх внутрішніх потреб з лінійними коефіцієнтами еластичності ЕП відносно змін даних факторів відповідно 29,33 і 28,33 %. Значно менший вплив мають ціна та втрати ЕЕ з коефіцієнтами еластичності відповідно 1 і 4%. В цьому контексті варто розглянути наявні тенденції та імовірні напрями розвитку ЕП електроенергетики України.

Напрями розвитку ЕП в контексті концепції СР. Розвиток ЕП, особливо в галузях промисловості, що суттєво впливають на стан НПС, зокрема, в електроенергетиці, на нашу думку, слід оцінювати в контексті забезпечення СР, тобто необхідно знаходити баланс між економічним та екологічним розвитком, пов'язаним із реалізацією ЕП. Не заперечуючи в цілому доцільності розвитку ЕП національної економіки, зокрема електроенергетики, вважаємо за необхідне в подальшому адаптацію методичного інструментарію для здійснення системної оцінки раціональності розвитку і реалізації ЕП в тій чи іншій галузі економіки в трьох вимірах: економічному, екологічному та соціальному. Можна очікувати, що здійснення такого аналізу дасть можливість оптимізувати

напрями розвитку та структуру ЕП національної економіки в галузевому і регіональному розрізах та робити науково обґрунтований вибір напрямів і масштабів реалізації ЕП з метою забезпечення сталого розвитку держави.

Оцінка впливу основних регульованих факторів на показники ЕП є недоцільною без врахування часового періоду, реальних та перспективних ресурсно-виробничих, інфраструктурних, ринкових можливостей, необхідних для здійснення зазначених змін. Їх визначення потрібне для розробки оптимальної стратегії розвитку ЕП шляхом реалізації комбінації відповідних напрямів.

Очевидно, що нарощування обсягів виробництва ЕЛП і ЕЕ може потребувати значних фінансових, матеріально-сировинних та часових ресурсів і спричинить додаткове навантаження на НПС територій. Разом з тим, даний напрям розвитку ЕП варто розглядати лише за умов якісного покращення техніко-технологічного рівня та безпеки ЕПП.

Не викликає сумніву раціональність скорочення рівня технологічних втрат і обсягів питомого та загального споживання ЕЕ, яке доцільно розглядати через призму впровадження програм енергозбереження, енергоефективних і ресурсозберігаючих технологій у промисловості та комунально-побутовому секторі, що забезпечуватиме позитивні ефекти зменшення енергомісткості продукції, національної економіки в цілому і, як наслідок, зростання ЕП, конкурентоспроможності, скорочення негативного впливу на НПС тощо. Цей шлях потребує також масштабних інвестицій і може реалізовуватись головним чином в середньо- і довгостроковому періодах. Крім того, важливо зазначити, що наведені вище напрями розглядаються як пріоритетні насамперед з погляду на забезпечення загального розвитку енергетики та інших галузей економіки України, а не ЕП.

Оптимізація ціни на відміну від попередніх варіантів розвитку ЕП практично не потребує фінансових, матеріально-сировинних та часових ресурсів і може реалізовуватись у коротко- і середньостроковому періодах. Одним із перспективних її методів є цінові аукціони, які

дозволяють заключати експортні контракти за найвищими можливими на торгах цінами. При цьому як експеримент пропонується використовувати так звані голландські аукціони, які проводяться починаючи з максимальної стартової ціни з подальшим зниженням до першого запиту на купівлю.

Виходячи з постулатів концепції СР і враховуючи, що країна-експортер може певною мірою керувати факторами $V_G, L_E, C_I, W_E, R_E, Q_E, D_E$, можна зробити висновок про доцільність оптимізації ЕП електроенергетики України в коротко- і середньостроковому періодах шляхом одночасної реалізації трьох останніх напрямів розвитку ЕП та електроенергетичного сектора в цілому. При цьому, враховуючи, що однією з головних цілей експорту ЕЕ є забезпечення додаткового прибутку, в короткостроковому періоді особливу увагу слід приділити оптимізації експортних цін, які є нижчими порівняно з середньоєвропейськими приблизно в 3,5–5 разів.

Висновки

Знайдені оцінкові показники, коефіцієнти покриття і реалізації, критерії оптимальності надають методичні основи для аналізу та оптимізації ЕП електроенергетики.

Систематизація факторів і характеристика їх впливу на ЕП, проведені в статті, дають змогу визначити потенційні об'єкти моніторингу, аналізу та керування з метою розвитку ЕП електроенергетики.

Визначені економічна модель ЕП і аналіз її чутливості до змін елементів дозволять кількісно оцінити їх вплив на потенційно можливі доходи від експорту ЕЕ.

Кількісна оцінка стохастичного впливу факторів ЕП на його реалізацію, вдосконалення методів визначення експортних цін на ЕЕ, обґрунтування ринково-географічних напрямів та оптимальних обсягів експорту ЕЕ із врахуванням постулатів концепції СР є перспективою подальших досліджень.

Б.С. Серебренников

ОЦЕНКА ЭКСПОРТНОГО ПОТЕНЦИАЛА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ УКРАИНЫ В КОНТЕКСТЕ КОНЦЕПЦИИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Рассматриваются проблемы оценки экспортного потенциала электроэнергетики. Предложены оценочные показатели, коэффициенты покрытия и реализации, критерии оптимальности. Осуществлена систематизация факторов и общая характеристика их влияния на экспортный потенциал. Определена экономическая модель экспортного потенциала и проанализирована ее чувствительность к изменениям элементов.

B.S. Serebrennikov

THE ESTIMATION OF EXPORT POTENTIAL OF POWER ENGINEERING OF UKRAINE IN CONTEXT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

This paper considers the problems of estimation of power engineering export potential. The evaluation indices, coefficients of coverage, implementation and optimality criteria are offered, which give the methodical bases for the analysis and optimization of export potential of power engineering. The systematization of factors and general description of their influence on export potential is carried out. The economic model of export potential is defined and the sensitiveness to the changes of its elements is analysed, which allows estimating their influence on feasibility of possible profits from the export of electric power.

1. *Товарна структура зовнішньої торгівлі України* / Державний комітет статистики України. – Режим доступу: www.ukrstat.gov.ua. – Назва з екрана.
2. *Розпорядження Кабінету Міністрів України “Про схвалення енергетичної стратегії України на період до 2030 року”*, № 145-р від 15.03.06 / Верховна рада України. – Режим доступу: www.rada.gov.ua. – Назва з екрана.
3. *Zgurovsky M.* The sustainable development gauging matrix and its applications. – К.: Publishing House “Polytechnika”, 2006. – 67 p.
4. *Герасимчук В.Г., Серебренников Б.С.* Маркетинг на електроенергетичному ринку як інструмент забезпечення економічної складової сталого розвитку // Соціально-економічні аспекти промислової політики: Сб. науч. тр. в 3 т. – Т. 3. – Донецьк: Ін-т економіки пром-сти НАН України, 2007. – С. 26–34.
5. *Падалко Л. П., Заборовский А. М.* Экспортно-импортные отношения Белоруссии в области электроэнергетики // Интеграция в энергетике и экономическая безопасность государства / Под общ. ред. Г. К. Вороновского, И. В. Недина. – К.: Знания Украины, 2005. – С. 226–230.
6. *Тевляшев А.Д., Синельникова О.И.* Математические модели и методы исследования энергообъединения с точки зрения экспорта электроэнергии // Интеграция в энергетике и экономическая безопасность государства / Под общ. ред. Г.К. Вороновского, И.В. Недина. – К.: Знания Украины, 2005. – С. 428–439.
7. *Гриценко А. В., Семенов В. М., Савченко Е. В.* Энергосистемы Украины и Европы. Когда и как объединяться? // Энергетика та електрифікація. – 2007. – № 2. – С. 3–9.
8. *Зубаиров Н.* Работать на Европу // Инвестгазета. – 2007. – № 17. – С. 36–37.
9. *Мирской В.* Экспорт электроэнергии: мифы и реалии // Зеркало недели. – 2006. – № 18. – С. 7.
10. *Прудка Н.* Назревает электрическая война // Эксперт. – 2006. – № 22. – С. 24–26.
11. *Электроэнергетика у 2007 році* / Міністерство палива та енергетики України. – Режим доступу: www.mre.kmu.gov.ua. – Назва з екрана.
12. *Матеріали розширеного засідання колегії Мінпалив-енерго від 14.02.2008 р.* / Міністерство палива та енергетики України. – Режим доступу: http://mre.kmu.gov.ua/fuel/control/uk/publish/article?art_id=123252. – Назва з екрана.

ЕЛЕКТРОНІКА, РАДІОТЕХНІКА ТА ЗАСОБИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

УДК 621.372.061

Ю.Х. Ніжебецька, О.І. Рибін, О.Б. Шарпан

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОРТОГОНАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЛІНІЙНИХ СИСТЕМ

Вступ

Розв'язання таких задач, як задачі аналізу, обробки, передачі і архівації сигналів часто потребує переходу від застосування перетворення Фур'є (та споріднених з ним перетворення Лапласа чи z -перетворення) до області ортогональних перетворень – перетворення Уолша–Адамара [1, 2], косинусного [3], похилого [4], REX [5] тощо. При цьому операцію диференціювання зводять до заміни її на розділену на величину кроку різницю двох відліків сигналу.

Для будь-якого дискретного матричного оператора ортогонального перетворення \overline{P}_γ матриці похідних від функцій перетворення \overline{D}_n^T будуть відрізнятися, але при розкладі добутку $\overline{P}_\gamma \overline{D}_n^T$ на власні значення і відповідні їм власні вектори [6] завжди отримуватимемо ті самі власні значення λ_i . При цьому власні вектори \overline{P}^T матриці розкладу для різних матричних дискретних операторів перетворень \overline{P}_γ будуть різними, але добуток $\overline{P}^T \overline{P}_\gamma$ завжди дає матрицю дискретного перетворення Фур'є.

В той же час корені (власні значення) λ_i розміщені на комплексній площині $\sigma + j\omega$ на одиничному колі з центром у точці (1, 0). Таке перетворення (на відміну від перетворення Фур'є), для якого розрахунки проводяться не вздовж осі аргументів $j\omega$, а вздовж дискретних точок на цьому одиничному колі, і названо RTF (Root Transfer Functions) [7, 8].

Однак заміна похідної розділеною різницею не є єдиним способом обчислення. Врахування більшої кількості відліків досліджуваного сигналу приведе до множини точніших немінімальних формул.

Постановка задачі

У даній статті проводиться аналіз заміни операції диференціювання більш точними, ніж

розділена різниця, немінімальними формулами різницевого рівнянь. В результаті цього очікується підвищення точності методу аналізу лінійних систем в області перетворення RTF, що може розширити можливості методу та області його застосувань.

Використання поліноміальних форм при аналізі лінійних систем у натуральних координатах [1, 9] значно ускладнює процедуру розв'язання різницевого рівнянь, тому автори статті вважають за необхідне розглянути результати використання поліноміальної апроксимації похідних в області трансформант перетворення RTF.

Проведення аналізу теореми про диференціювання і реалізацію RTF-перетворення при застосуванні немінімальних формул обчислення похідної

Як відомо [1], при реалізації різницевого методу аналізу лінійних систем в області спектрів трансформант ортогональних перетворень система диференціальних рівнянь

$$\begin{aligned} a_m \frac{d^m}{dt^m} y + a_{m-1} \frac{d^{m-1}}{dt^{m-1}} y + \dots + a_1 y + a_0 &= \\ = b_n \frac{d^n}{dt^n} x + b_{n-1} \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} x + \dots + b_1 x + b_0 \end{aligned}$$

зводиться до такого вигляду:

$$\begin{aligned} [a_m (\overline{A})^m + a_{m-1} (\overline{A})^{m-1} + \dots + a_1 \overline{A} + a_0 \overline{E}] \overline{Y}_\xi &= \\ = [b_n (\overline{A})^n + b_{n-1} (\overline{A})^{n-1} + \dots + b_1 \overline{A} + b_0 \overline{E}] \overline{X}_\xi, \end{aligned} \quad (1)$$

де $\overline{A} = \overline{P}_\gamma \overline{D}_n^T$ – квадратна матриця порядку N ; \overline{P}_γ – нормований матричний оператор використовуюваного для аналізу прямого дискретного ортогонального перетворення порядку N [$(\overline{P}_\gamma)^{-1} = (\overline{P}_\gamma)^T$]; \overline{D}_n^T – квадратна матриця похідних від оберненого дискретного нормованого перетворення; N – формат перетворення; \overline{Y}_ξ , \overline{X}_ξ – стовпці амплітуд трансформант перетворення реакції та дії відповідно розміру $N \times 1$; T – знак транспонування.

Узагальнена форма запису рівняння (1) має вигляд

$$\overline{A}_\Sigma \overline{Y}_\xi = \overline{B}_\Sigma \overline{X}_\xi,$$

звідки розв'язання задачі аналізу (з подальшим оберненим перетворенням спектра) зводиться до обернення матриці \overline{A}_Σ , тобто

$$\overline{Y}_\xi = (\overline{A}_\Sigma)^{-1} \overline{B}_\Sigma \overline{X}_\xi. \quad (2)$$

Однак саме по собі обернення матриці \overline{A}_Σ викликає значні обчислювальні труднощі. Спрощення обчислень (2) пов'язане з розкладом матриці \overline{A} за власними значеннями λ_i та власними векторами $\overline{\pi}_i$

$$\overline{A} = \overline{\Pi}^* \overline{\lambda} \overline{\Pi}^T, \quad (3)$$

де $\overline{\lambda}$ – діагональна матриця власних значень; $\overline{\Pi}^T$ – матриця власних векторів, рядками якої є власні вектори матриці \overline{A} ; $\overline{\Pi}^*$ – матриця власних векторів $\overline{\pi}_i^*$; * – знак комплексного спряження.

При цьому власні вектори $\overline{\pi}_i$, $\overline{\pi}_i^*$ для різних перетворень різні, тоді як власні значення матриці $\overline{\lambda}$ для всіх перетворень збігаються (якщо перша похідна обчислюється як розділена різниця). Розходження в матриці $\overline{\lambda}$ може бути тільки в упорядкуванні власних значень (поблочно для блочно-діагональних матриць \overline{A} або “наскрізна”).

Обчислення власних значень λ_i не становить труднощів, оскільки всі вони розміщені на одиничному колі в комплексній площині $p = \sigma + j\omega$ з центром у точці (1,0). Тоді при форматі $N = 2$ власні значення становитимуть $\lambda_0 = 0$, $\lambda_\infty = 2$. При форматі $N = 4$ до них додаються значення, отримані діленням півкіл січною, перпендикулярною дійсній осі в точці (1,0), на дві частини: $\lambda_1 = 1 + j$, $\lambda_1^* = 1 - j$. При форматі $N = 8$ до вже знайдених власних значень додаються λ_2 , λ_3 , λ_2^* , λ_3^* , розміщені посередині чотирьох дуг, утворених точками $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_\infty, \lambda_1^*$. Кожне збільшення формату N вдвічі додає в матриці $\overline{\lambda}$ наступні власні значення, що лежать посередині дуг між парою вже знайдених раніше власних значень.

При аналізі різницевого рівняння (1) з врахуванням (3) рівняння (2) можна звести до такого вигляду:

$$\overline{Y}_\xi = \overline{\Pi}^* \overline{K}(\lambda) \overline{\Pi}^T \overline{X}_\xi,$$

де $\overline{K}(\lambda)$ – діагональна матриця дискретних функцій кола, що пов'язує спектри реакції \overline{Y}_ξ і дії \overline{X}_ξ , i -й елемент діагоналі якої має вигляд

$$K(\lambda_i) = \frac{a_m(\lambda_i)^m + a_{m-1}(\lambda_i)^{m-1} + \dots + a_1\lambda_i + a_0}{b_n(\lambda_i)^n + b_{n-1}(\lambda_i)^{n-1} + \dots + b_1\lambda_i + b_0},$$

де $K(\lambda_i)$ може бути отримано заміною в операторному виразі функції кола $K(p)$ змінної p на дискретне значення λ_i .

Наведені результати справедливі для дискретних перетворень у випадку заміни операції диференціювання розділеною на величину кроку різницею двох відліків сигналу:

$$\frac{d}{dt}x \rightarrow x(k) - x(k-1). \quad (4)$$

Однак існує множина інших (немінімальних) формул обчислення похідних у різницевих методах, одержаних, наприклад, в разі обчислення трьох і більше відліків дискретизованого сигналу. Такі немінімальні формули, зокрема при врахуванні трьох точок відліків сигналу, мають вигляд

$$\frac{d}{dt}x \rightarrow \frac{3x(k) - 4x(k-1) + x(k-2)}{2}, \quad (5a)$$

$$\frac{d}{dt}x \rightarrow \frac{x(k+1) - x(k-1)}{2}, \quad (5b)$$

$$\frac{d}{dt}x \rightarrow \frac{-x(k+2) + 4x(k+1) - 3x(k)}{2} \quad (5в)$$

для еквідистантної дискретизації сигналу $x(t)$ з нормованим кроком $\Delta t = 1$, де k – номер відліку в натуральних координатах. В цьому випадку матриці \overline{D}_H^T і \overline{A} в (1) і (3) мають інші значення для того ж самого ортогонального перетворення \overline{P}_γ , і власні значення $\overline{\lambda}$ в матриці \overline{A} розміщуються не на колі, а на кардіоїді (рис. 1, а) для формули (5а), що описується такими параметричними рівняннями:

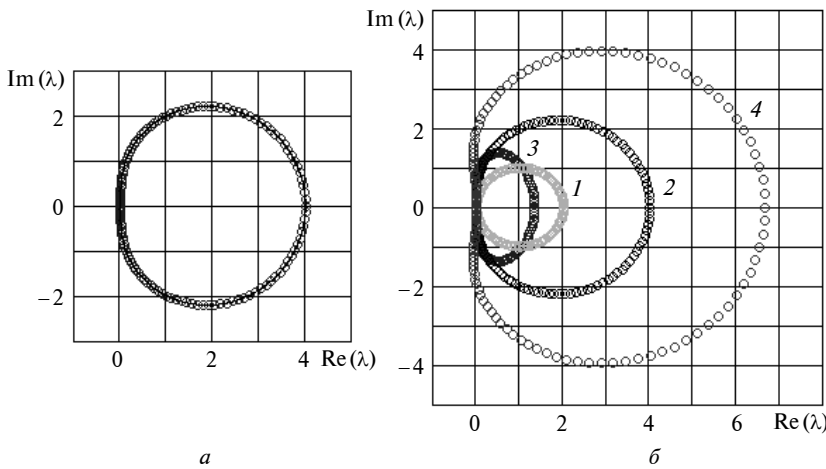


Рис. 1. Множини власних значень матриці \bar{A} для різних формул обчислення першої похідної

$$\begin{cases} \omega(\psi) = \sin(\psi)(2 + \cos(\psi)), \\ \sigma(\psi) = \cos(\psi)(2 + \cos(\psi)) + 1. \end{cases}$$

Позначивши $\Lambda(\psi_i) = \sigma(\psi_i) + j\omega(\psi_i)$, можна подати загальний спосіб обчислення i -го власного числа λ_i матриці \bar{A} .

При форматі $N = 2$ $\lambda_0 = \Lambda(\pi) = 0$, $\lambda_1 = \Lambda(0) = 4$, тобто значення аргументів ψ_0 і ψ_1 отримано поділом кола на дві частини.

При форматі $N = 4$ до знайденого значення додаються власні значення, аргументи ψ_{21} і ψ_{22} для яких отримано розділенням навпіл двох утворених півкіл. У такий спосіб $\lambda_2 = \Lambda\left(\frac{\pi}{2}\right) =$

$$= 1 + 2j, \quad \lambda_2^* = \Lambda\left(-\frac{\pi}{2}\right) = 1 - 2j.$$

Аналогічно, при $N = 8$ до них додаються значення, аргументи для знаходження яких отримано діленням навпіл чотирьох дуг, утворених значеннями аргументів $\psi_1, \psi_{21}, \psi_0, \psi_{22}$:

$$\begin{aligned} \lambda_3 &= \Lambda\left(\frac{\pi}{4}\right) = 2,914 + 1,914j, \\ \lambda_3^* &= \Lambda\left(-\frac{\pi}{4}\right) = 2,914 - 1,914j, \\ \lambda_4 &= \Lambda\left(\frac{3\pi}{4}\right) = 0,086 + 0,914j, \\ \lambda_4^* &= \Lambda\left(-\frac{3\pi}{4}\right) = 0,086 - 0,914j. \end{aligned}$$

Наступне збільшення формату N удвічі веде до появи власних значень у матриці $\bar{\lambda}$, для знаходження яких аргументи ψ_i будуть лежати посередині дуг, утворених парами вже знайдених раніше. При цьому добуток $\bar{\Pi}^T \bar{P}_\gamma$ власних векторів матриці \bar{A} і дискретного оператора прямого ортогонального перетворення завжди дасть базові функції перетворення $e^{\pm j\omega_i n}$, упорядкування яких залежить від виду перетворення \bar{P}_γ .

У випадку обчислення похідних від функції $x(k)$ за чотирма відліками одержимо формули, аналогічні (4), у вигляді

$$\frac{d}{dt}x \rightarrow \frac{2x(k+3) - 9x(k+2) + 18x(k+1) - 11x(k)}{6}, \quad (6a)$$

$$\frac{d}{dt}x \rightarrow \frac{-x(k+2) + 6x(k+1) - 3x(k) - 2x(k-1)}{6}, \quad (6б)$$

$$\frac{d}{dt}x \rightarrow \frac{2x(k+1) + 3x(k) - 6x(k-1) + x(k-2)}{6}, \quad (6в)$$

$$\frac{d}{dt}x \rightarrow \frac{11x(k) - 18x(k-1) + 9x(k-2) - 2x(k-3)}{6}, \quad (6г)$$

для яких власні значення їх матриць \bar{A} розміщуються на кардіоїдах рис. 1, б. На рисунку показані власні значення перетворення, для якого похідна $\frac{d}{dt}x \rightarrow x(k) - x(k-1)$ (коло 1)

обчислена за формулою (5а) (кардіоїда 2), а також значення для похідних за формулами (6в) і (6г) (кардіоїди 3 і 4, відповідно).

Наведені у формулах (5а) і (6а)–(6в) немінимальні вирази для обчислення похідних слід використовувати для аналізу лінійних систем у разі, якщо діями є функції, що не мають розривів першого роду. Для функцій з такими розривами (наприклад, функція Хевісайда) в області одиничного скачка будь-яка поліноміальна апроксимація буде гіршою, ніж проста розділена різниця, але для обчислення реакції на

інших інтервалах осі часу більшу точність дасть поліноміальна апроксимація.

Звичайними обмеженнями підвищення степеня поліноміальної апроксимації при аналізі в натуральних координатах є значне ускладнення обчислень і той факт, що поліном та апроксимована функція збігаються лише у вузлах інтерполяції [10], причому розходження між функціями (поза вузлами інтерполяції) збільшується із зростанням степеня полінома. В разі використання дискретних операторів в області перетворення RTF таких обмежень нема, оскільки обчислення проводяться тільки для дискретних точок і для відомих власних частот λ_i .

Для всіх розглянутих способів обчислення похідних добуток матриці власних векторів $\overline{\overline{P}}^T$ і відповідного матричного оператора дискретного ортогонального перетворення дає оператор з дискретними відліками функцій $e^{\pm j\omega_1 n}$, де $\omega_1 = \frac{2\pi}{N}$, як і для дискретного перетворення Фур'є.

Тепер, використовуючи отриману множину формул обчислення похідних, перейдемо до розгляду теореми про диференціювання.

Як було зазначено вище, власні значення матриці $\overline{\overline{A}}$ для всіх дискретних перетворень збігаються тоді, коли операція диференціювання замінюється однією різницевою формулою обчислення першої похідної.

Таким чином, особливості теореми про диференціювання будуть залежати тільки від використаного різницевого рівняння і не залежатимуть від виду перетворення, за яким відбувається аналіз.

Як відомо, при використанні перетворення Фур'є для аналізу лінійних систем диференціюванню в часовій області відповідає множення на $j\omega$ в частотній. Для дискретного перетворення Фур'є існує тільки $N/2 + 1$ незалежних спектральних точок: амплітудний спектр є парною функцією щодо відліку $N/2$, а фазовий спектр – непарною функцією щодо цієї точки. З огляду на це, оператор дифе-

ренціювання для дискретного перетворення Фур'є матиме такий вигляд:

$$\begin{cases} j \frac{2\pi n}{N} & \text{при } n \in (0; N/2), \\ j2\pi \left(1 - \frac{n}{N}\right) & \text{при } n \in (N/2; N-1). \end{cases}$$

І перш ніж переходити до розгляду теореми про диференціювання при використанні перетворення RTF, наведемо амплітудний і фазовий розподіл цього оператора для формату перетворення $N = 16$ (рис. 2).

Тепер розглянемо випадок заміни операції диференціювання розділеною на величину кроку різницею двох відліків сигналу (4).

Розміщення власних значень $\overline{\overline{\lambda}}$ матриці $\overline{\overline{A}}$ буде мати вигляд кола. Таким чином, зміна модуля власного числа відбуватиметься за законом $|\lambda(n)| = 2 \sin\left(\frac{\pi n}{N}\right)$, а зміна фази – за за-

коном $\varphi(n) = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi n}{N}$ (рис. 3).

При обчисленні похідної за немінімальними формулами із врахуванням трьох точок відліків дискретного сигналу одержимо різницеві рівняння (5в). Власні значення $\overline{\overline{\lambda}}$ у матриці $\overline{\overline{A}}$ для формули (5а) розміщуються на кардіоїді (див. рис. 1). Зміна модуля і фази власного числа показані на рис. 4.

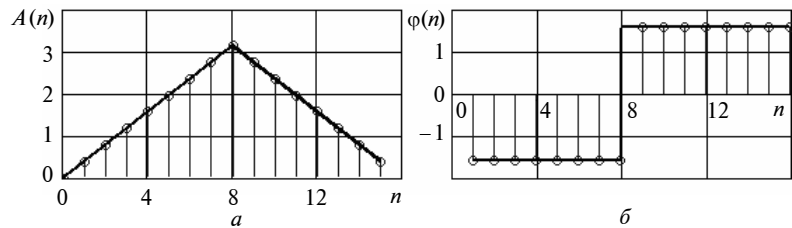


Рис. 2. Амплітудний (а) і фазовий (б) розподіл оператора диференціювання при ДПФ

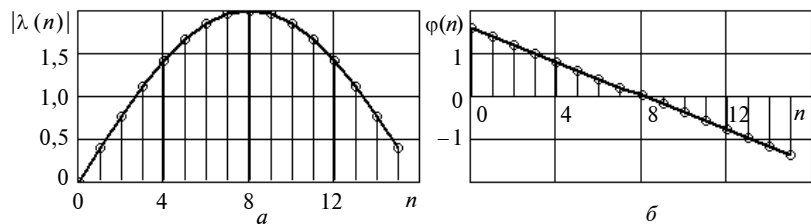


Рис. 3. Зміна модуля (а) і фази (б) власних чисел матриці $\overline{\overline{A}}$ числа при використанні різницевого рівняння (4)

Кардіоїда для формули (5в) буде дзеркально відбитою відносно осі ординат копією кардіоїди на рис. 3. З цього випливає, що розподіл модуля власних значень буде аналогічним, а фазовий розподіл матиме вигляд $\varphi'(n) = \pi - \varphi(n)$.

В разі обчислення похідної функції за чотирма відліками будемо використовувати формули у вигляді (6а)–(6г). Аналогічно попередньому випадку, розглянемо тільки власні значення для формул (6в) і (6г), оскільки власні значення для (6а) і (6б) будуть розміщуватися на відбитих відносно осі ординат їх копіях.

Розміщення власних значень λ у матриці A для формули (6в) має вигляд кардіоїди 3 на

рис. 1. Зміну модуля і фази власного числа при цьому показано на рис. 5.

Власні значення λ у матриці A для формули (6г) розміщуються на кардіоїді 4 рис. 1. Зміну модуля і фази власного числа наведено на рис. 6.

Для ілюстрування деяких можливостей методу аналізу лінійних диференціальних рівнянь, який можна назвати методом узагальнених РФТ-функцій (він відрізняється від перетворення Фур'є тим, що аналіз проводиться на комплексних власних числах λ_i , а не на частотах $jn\omega_1$), розглянемо простий приклад.

Нехай на вхід кола рис. 7, а надходить обмежене знизу гармонійне коливання (рис.7, б)

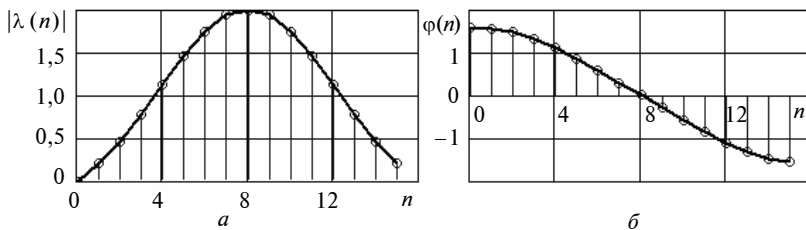


Рис. 4. Зміна модуля (а) і фази (б) власних чисел матриці числа при використанні різницевого рівняння (5а)

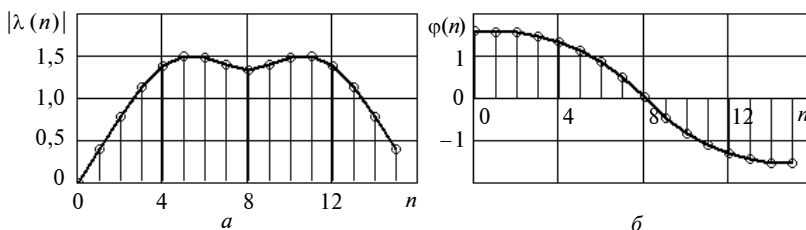


Рис. 5. Зміна модуля (а) і фази (б) власних чисел матриці числа при використанні різницевого рівняння (6в)

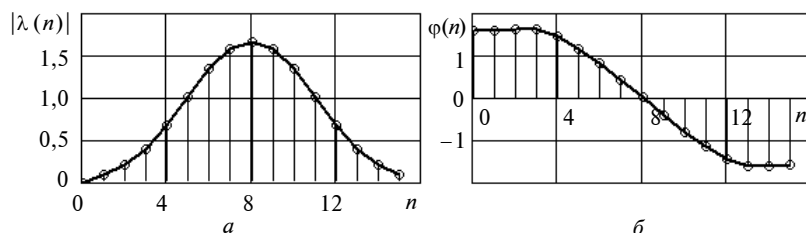


Рис. 6. Зміна модуля (а) і фази (б) власних чисел матриці числа при використанні різницевого рівняння (6г)

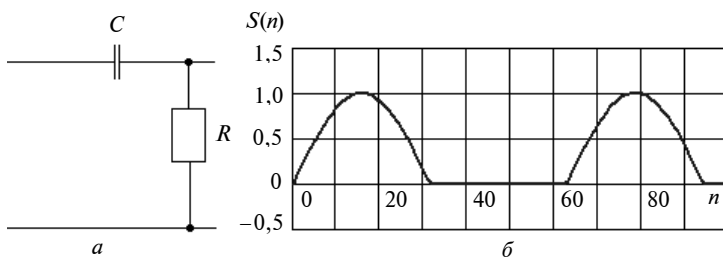


Рис. 7. Досліджуване електричне коло (а) і вхідний сигнал (б)

$$S(n) = \begin{cases} \sin\left(\frac{n}{10}\right) & \text{при } 0 \leq n < \frac{T}{2}, \\ 0 & \text{при } \frac{T}{2} \leq n < T. \end{cases}$$

Знайдемо коефіцієнт передачі кола при нормованих значеннях параметрів ($R = 1$ і $C = 1$):

$$K(p) = \frac{p}{1+p},$$

звідки, замінивши p на λ_n , одержимо

$$K(\lambda_n) = \frac{\lambda_n}{1+\lambda_n}.$$

На рис. 8, а наведено реакцію, а на рис. 8, б – модуль абсолютних похибок для різних формул обчислення похідних (крива 1 – для розділеної різниці двох відліків вхідного сигналу; крива 2 – для формули (5а); крива 3 – для формули (6а), крива 4 є ідеальною). Очікуване зменшення похибки обчислень із зростанням числа точок, по яких виконується обчислення похідних, легко помітити на рис. 8, б. Через близьке взаєморозміщення кривих для наочності отриманих результатів на графіках наведено перші 50 відліків вихідного сигналу.

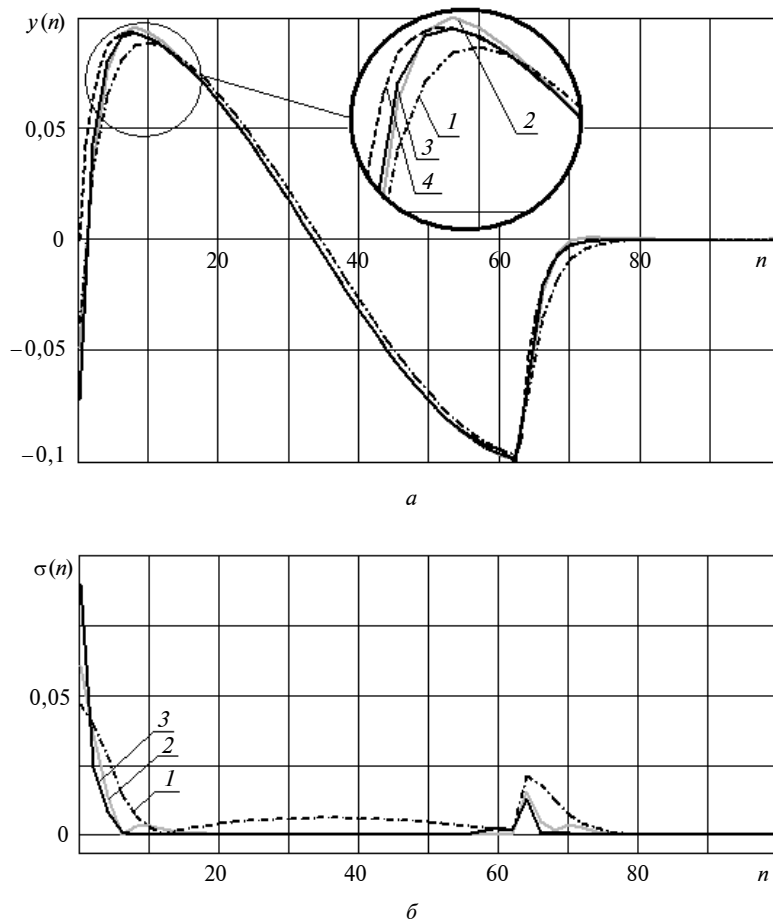


Рис. 8. Реакція кола (а) і модуль (б) абсолютних похибок при обчисленні похідної за формулами (4), (5а) і (6а)

Висновки

1. Апроксимація похідних немінімальними різницевиими рівняннями (для ділянок дій, в яких такі похідні існують) збільшує точність обчислень.

2. Якщо дія містить у собі розриви другого роду (похідна не існує), то більшу точність на цій ділянці дає апроксимація похідної простою розділеною різницею.

3. У подальшому необхідно дослідити межі можливого підвищення точності залежно від степеня полінома немінімальної форми апроксимації похідної.

4. Перехід до немінімальних формул обчислення похідної при аналізі лінійних систем в області власних значень (коренів) перетворення RTF не приводить до будь-якого ускладнення обчислень, оскільки всі власні значення λ_n (як і функції $e^{\pm j\omega_1 n}$) визначаються при формуванні операторів дискретного перетворення RTF заздалегідь.

Ю.Х. Нижебецкая, А.И. Рыбин, О.Б. Шарпан

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

Проводится анализ применения неминимальных формул вычисления производной при использовании метода ортогональных преобразований, что приводит к повышению точности выбранного метода по сравнению со случаем применения формулы разделенной разности.

Yu.Kh. Nizhebetska, O.I. Rybin, O.B. Sharpan

THE INCREASE OF THE PRECISION OF THE ORTHOGONAL TRANSFORMATIONS FOR THE ANALYSIS OF THE LINEAR SYSTEMS

The study proposes the analysis of application of the nonminimum derivation formulas, using the method of the orthogonal transformation. We determine that it leads to the increase of precision of the chosen method, comparing with the application of the formula of the difference quotient.

1. Рыбин А.И. Анализ линейных цепей в базе преобразований Уолша // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2004. – № 5. – С. 36–41.
2. Рыбин О.И., Ткачук А.П. Анализ линейных систем в области трансформант перетворення Уолша–Адамара //

Вісник НТУУ “КПІ”. Сер. Радіотехніка. Радіоапаратуробудування. – 2006. – Вип. 31. – С. 14–23.

3. Pratt W.K. Digital Image Processing. – New York: Wiley & Sons, 1991. – V. 1,2. – 732 p.

4. *Ахмед Н., Рао К.* Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов / Пер. с англ. под общ. ред. Н.Б.Фоменко. – М.: Связь, 1980. – 248 с.
5. *Рыбин А.И.* Ортогональное экспоненциальное преобразование REX // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2004. – № 2. – С. 3–9.
6. *Абакумов В.Г., Рыбин О.И., Сватош Й.* Біомедичні сигнали. Генезис, обробка, моніторинг. – К.: Нора-прінт, 2001. – 516 с.
7. *Рыбин О.И., Ткачук А.П.* Аналіз лінійних систем в області трансформант кратного перетворення EIWAL // Вісник НТУУ "КПІ". Сер. Радіотехніка. Радіоапаратурибудування. – 2006. – Вип. 33. – С. 31–38.
8. *Рыбин А.И., Ткачук А.П.* Анализ линейных систем в области трансформант собственных преобразований RTF // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2006. – № 11. – С. 56–63.
9. *Рыбин А.И.* Метод модификаций для анализа линейных цепей в базисе функций Уолша // Там же. – 2004. – № 6. – С. 36–41.
10. *Годунов С.К., Рябенский В.С.* Разностные схемы. – М.: Наука, 1973. – С. 12–19, 100–108.

Рекомендована Радою
радіотехнічного факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
21 січня 2008 року

ЕНЕРГЕТИКА ТА НОВІ ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 536.24

О.В. Баранюк, Є.М. Письменний,
О.В. Семеняко

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ПОТОКУ В МІЖРЕБЕРНИХ КАНАЛАХ ПОВЕРХОНЬ З ПЛАСТИНЧАСТО-РОЗРІЗНИМ ОРЕБРЕННЯМ МЕТОДАМИ ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Вступ

Забезпечення оптимальних режимів охолодження елементів радіоелектронної апаратури, персональних комп'ютерів (ПК) та інших теплонавантажених частин електронного устаткування вимагає нових рішень для вдосконалення систем охолодження. Одним із перспективних напрямків вирішення цього питання є використання тепловідвідних поверхонь з високою теплоаеродинамічною ефективністю, до яких можна віднести поверхні з розрізним оребрнням [1–3]. Питання інтенсифікації теплообміну при конструюванні розвинутих поверхонь нерозривно пов'язані з вивченням процесів турбулентного переносу теплоти та імпульсу.

На сьогодні накопичено великий досвід з вивчення закономірностей турбулентної течії в каналах прямокутного перерізу [4–6]. Але ще мало праць присвячено дослідженню структури потоку в міжреберних напіввідкритих каналах пластинчасто-ребристих поверхонь, а також у каналах із розрізними стінками. У зв'язку з цим в НТУУ “КПІ” виконані експериментальні дослідження закономірностей конвективного теплообміну поверхонь з пластинчасто-розрізним оребрнням, впливу глибини розрізки на інтенсивність теплообміну, а також на визначення структури потоку в центральній площині міжреберних каналів [7]. Встановлено, що розрізка поверхні ребра на “пелюстки” при відносній глибині розрізки $h_p/h = 0,4; 0,6; 0,8$ сприяє інтенсифікації теплообміну в 1,16–1,25 рази порівняно з пластинчасто-ребристою поверхнею без розрізки. Максимальна інтенсивність теплообміну спостерігається при глибині розрізки $h_p/h = 0,6$. Аеродинамічний опір у цьому випадку збільшується всього на 10–35%. Встановлено наявність кореляції між рівнем збудженості потоку та глибиною розрізки ребер, а також екстремальний характер цієї залежності. Так, для ребер з відотною глибиною розрізки $h_p/h = 0; 0,4; 0,8$ інтенсивність пульсацій становить $\overline{w'}/\overline{w} = 4,2\%; 5,5\%; 5,3\%$, відповідно, тоді як при $h_p/h = 0,6$ інтенсивність пульсацій досягає 7,3%.

Але існуючі традиційні методи експериментальних досліджень не дають можливості отримати поглиблену картину механізму інтенсифікації процесів переносу. Вирішити цю проблему певною мірою можна числовим моделюванням на основі сучасних програмних комплексів.

Постановка задачі

Дана стаття ставить за мету поглибити уявлення про вплив глибини розрізки на конвективний теплообмін та структуру потоку в напіввідкритих каналах розвинутих поверхонь, характерних для елементів охолодження ПК, методами числового моделювання, вивчити вплив інших геометричних параметрів розрізки.

Методика досліджень і конструкція моделі поверхні

Методика досліджень. При дослідженнях ставилася задача розрахувати тривимірний рух в'язкої рідини, що омиває розрізні ребра дослідної поверхні в поздовжньому напрямку.

Дослідна поверхня складається з плоскої мідної основи розмірами $L \times L = 70 \times 70$ мм завтовшки 3 мм, до якої припаяні пластинчасті ребра висотою $h = 35$ мм з кроком $t = 6,9$ мм, розрізані у верхній частині на окремі “пелюстки” прямокутної форми. Досліджувалися три відносні глибини розрізки: $h_p/h = 0,4; 0,6; 0,8$. Докладний опис тепловідвідних поверхонь і умов, в яких проводили дослідження, міститься в [1].

На рис. 1 зображено дослідну теплообмінну поверхню, що розміщена в плоскопаралельному каналі аеродинамічної труби. Тонкими осьовими лініями виділено дослідний елемент поверхні, стрілками показано напрямок повітряного потоку.

Елемент вибирався таким, щоб змоделювати гідродинамічну картину течії рідини в напіввідкритих каналах прямокутної форми, які утворені ребрами і основою теплообмінної поверхні. З цієї метою було вибрано середнє за шириною радіатора ребро, що за формою і конфігурацією відповідає натурному і розміщене на плоскій основі шириною, яка дорівнює кроку ребер.

Завдяки симетричності картин течії в поперечному перерізі міжреберних каналів область течії біля виділеного ребра обмежувалися двома площинами, що знаходяться на відстані на півкроку від осі ребра, а також поверхнями основи ребра (знизу) і стінки аеродинамічної труби (зверху). Взаємний вплив пограничних шарів, що розвиваються на поверхнях ребер, враховувався симетричними граничними умовами [8].

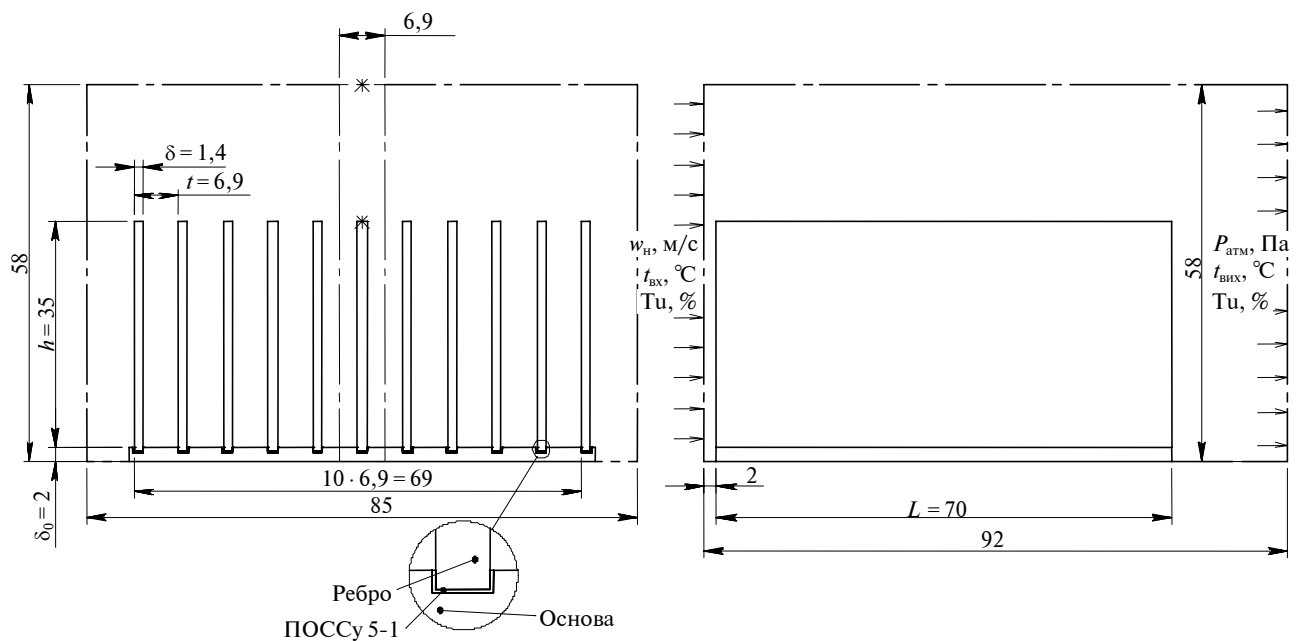


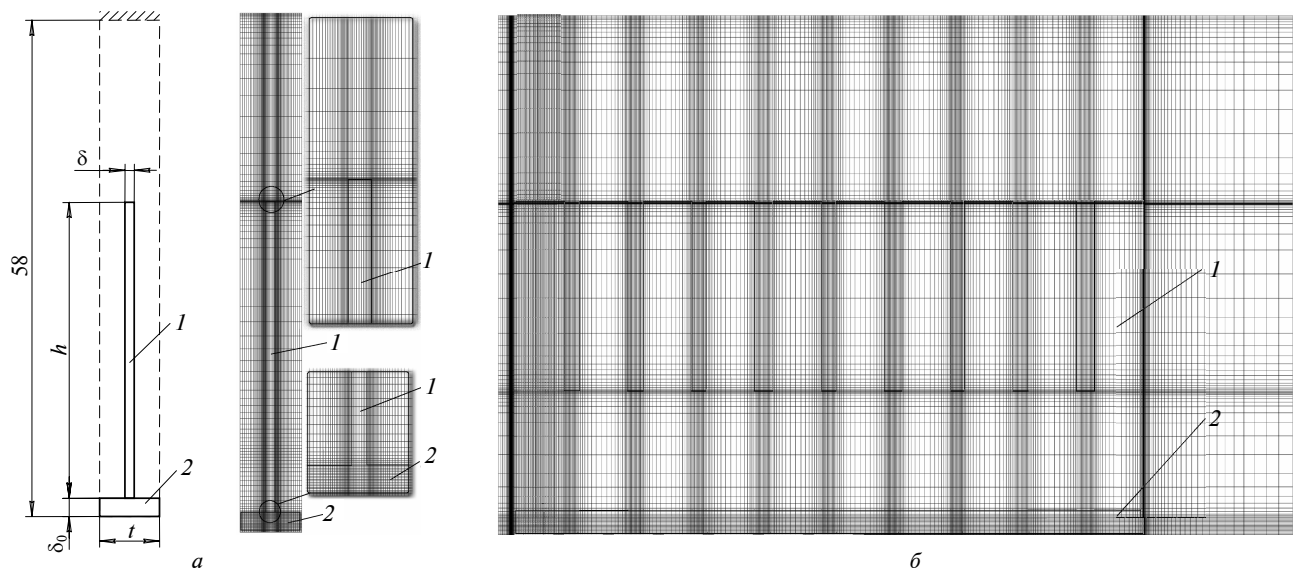
Рис. 1. Область розв'язання задачі

Розрахункова модель. У даній статті розробка розрахункової моделі ґрунтувалася на побудові геометричної моделі розрахункової області, дискретизація якої проходила у відповідності з уявленнями про вплив характеристик сітки скінченних елементів на стійкість та збіжність розв'язків, задання граничних умов [9]. Розрахункова область покривалася нерівномірною, зі згущенням до стінок основи і ребер елемента нагрівання прямокутною сіткою. Мінімальний та максимальний кроки при цьому становили $5 \cdot 10^{-5}$ і $1 \cdot 10^{-4}$ м. У поздовжньому напрямку розрахункова сітка складається з двох декартових сіток: рівномірної – з кроком $5 \cdot 10^{-5}$ м, розміщеної поблизу передньої

кромки ребра, і нерівномірної – із згущенням до торців ребра.

При моделюванні каверни, утвореної розрізкою, використовувалась декартова сітка, яка в поздовжньому напрямку згущалася до стінок каверни, а в поперечному розбивалася на рівномірні інтервали з кроком $1 \cdot 10^{-4}$ м. Тривимірна розрахункова сітка при $h_p/h = 0,6$ показана на рис. 2.

При моделюванні використовувалися така система координат, що і при проведенні експериментальних теплових досліджень. Додатний напрямок осі OX відповідає поздовжньому омиванню поверхні ребра повітряним потоком, вісь OY направлена від дна каналу вздовж висоти

Рис. 2. Розрахункова сітка: а – вид спереду; б – вид збоку: 1 – розрізне ребро при $h_p/h = 0,6$; 2 – основа

ребра, а додатний напрямок осі OZ вибирається по нормалі до площини рисунку.

Вибраний алгоритм розв'язання базується на неявному скінченнооб'ємному методі розв'язання рівнянь Нав'є–Стокса, замкнених за допомогою моделі турбулентності Ментера, оскільки, як показали дослідження авторів [10, 11], ця модель є найбільш прийнятною для розрахунку відривних течій. Ініціалізація розв'язання проведена в абсолютній системі координат за умовами входу в канал.

Теплофізичні властивості повітря задавалися у вигляді поліноміальних функцій температури. Модель враховувала наявність прошарку олов'яно-свинцевого припою, завдяки якому ребро було припаяне до основи.

Теплофізичні властивості твердих тіл задавалися постійними. Стінки, які обмежують канал зверху та знизу, вважалися адіабатними. За визначальний розмір брався еквівалентний діаметр d_e теплообмінної поверхні.

Гідродинамічні початкові умови формувалися таким чином:

- на вході в канал задавалася температура $t_{вх}$; повний тиск повітряного потоку p_0 розраховувався на основі залежності

$$p_0 = p_s + \frac{1}{2}\rho|w_h|^2,$$

де p_s – статичний тиск; w_h – швидкість набігаючого повітряного потоку;

- інтенсивність турбулентних пульсацій бралася такою: $\sqrt{\overline{w'^2}}/w = 4\%$, що характерно для аеродинамічної труби, на якій проводили дослідження теплообміну і аеродинаміки натурних теплообмінних поверхонь;

- на виході з каналу задавалися так звані “м'які” граничні умови (умова продовження розв'язання) [9].

Результати досліджень та їх аналіз

Достовірність числових експериментів визначалася порівнянням дослідних і розрахункових даних. З цією метою результати числових досліджень порівнювалися з результатами праці [7], де експериментальні дані давалися у вигляді:

- відносних швидкостей по висоті ребра $w/w_h = f(y/h)$ при фіксованих значеннях $x/L = \text{const}$;

- відносних швидкостей по довжині ребра $w/w_h = f(x/h)$ при фіксованих значеннях $y/h = \text{const}$;

- відносних осереднених (по висоті ребра) швидкостей вздовж довжини ребра $\bar{w}/w_h = f(x/L)$.

Нерозрізне ребро. Спочатку моделювалася течія на суцільному нерозрізному ребрі. Було обчислено розподіл швидкостей потоку в центральній площині міжреберного каналу в різних перерізах по висоті і довжині ребра при двох значеннях швидкості набігаючого потоку: 1-й режим – $w_h = 10$ м/с, 2-й режим – $w_h = 5$ м/с. Нижче проведено детальний аналіз результатів співставлення розрахункових і дослідних даних для 1-го режиму.

Зроблені в праці [7] висновки підтверджуються схемами течії, що відображають особливості розвитку пограничного шару на поверхні ребра і основи. Так, по довжині ребра (рис. 3) поблизу передньої гострої кромки спостерігається прискорення потоку, що є наслідком підтиснення потоку через утворення відривних пазирів на поверхні ребра і основи. Аналіз рис. 3 свідчить, що розподіл швидкості має максимум у перерізі $x/L \approx 0,1$ і мінімум при $x/L \approx 0,21$. Вказану зміну швидкості можна пояснити про-

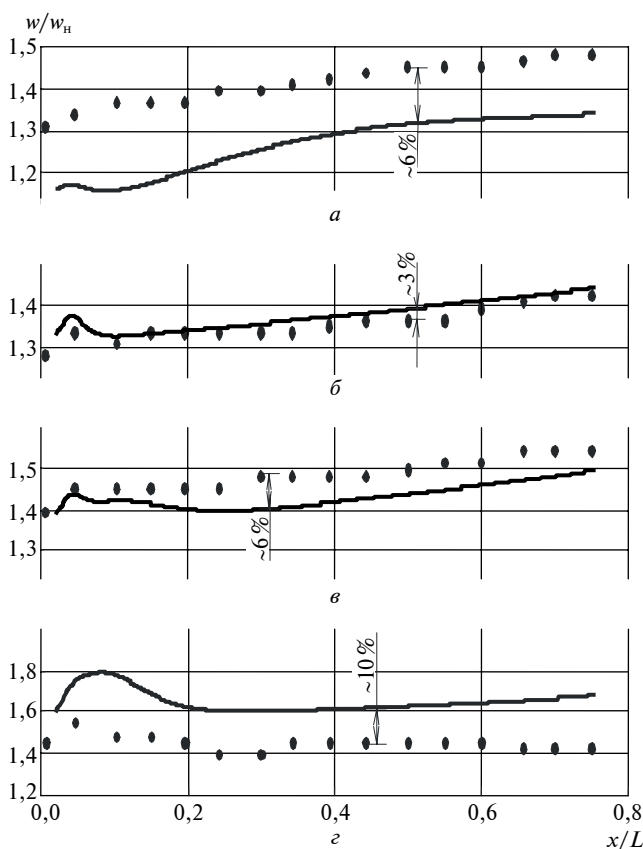


Рис. 3. Розподіл відносної швидкості по довжині нерозрізного ребра: а – $y/h = 0,99$; б – $y/h = 0,50$; е – $y/h = 0,25$; з – $y/h = 0,14$

явом так званого дифузорно-конфузорного ефекту, коли внаслідок утворення відривного пузиря виникає спочатку звуження перерізу, що веде до прискорення потоку з наступним розширенням, яке призводить до зменшення швидкості. В інших перерізах по довжині ребра швидкість потоку монотонно збільшується, що пов'язано зі збільшенням товщини пограничного шару.

Як видно з рис. 3, розрахункові дані добре узгоджуються з експериментальними. Так, при $x/L > 0,2$ і $y/h = 0,14$ відхилення не перевищує 10%. В інших перерізах при $0,25 < y/h \leq 0,83$ відхилення не перевищує $\pm 8\%$, причому відхилення дослідних даних від розрахункових у центрі каналу ($y/h = 0,5$) по довжині ребра становить 3%.

Динаміку зростання пограничних шарів на поверхні ребра в перерізі $y/h = 0,5$ ілюструє рис. 4, який підтверджує, що поблизу передньої гострої кромки утворюється відривний пузир довжиною 4–5 мм. Довжина зони відриву і розташування точки при'єднання добре узгоджуються з експериментальними працями [12, 13].

Біля торця ребра при $y/h = 0,99$ поблизу входу картина течії інша: внаслідок впливу потоку, що рухається над ребром, слабшає вплив відриву на передній кромці, що призводить до згладження максимуму, і течія носить монотонно прискорений характер.

Числовий експеримент підтвердив виявлену експериментальним шляхом асиметричність профілів швидкості поблизу входу в міжреберний канал (рис. 5) і поступове вирівнювання профілю швидкості під час просування потоку вглиб міжреберного каналу від основи в бік відкритого торця ребра.

Наведений на рис. 6 розподіл відносної осередненої по висоті ребра швидкості також добре

узгоджується з експериментальними даними: відхилення результатів експерименту і розрахунку в цьому випадку становить лише 0,5% при $w_n = 10$ м/с.

На рис. 7, а зображено результати обчислень ізотх по висоті ребра в прямокутному каналі, утвореному основою і ребрами розвинутої теплообмінної поверхні. З аналізу праць [4–6] відомо, що в кутах утримуються порівняно високі швидкості. Причина цього полягає в існуванні в прямих каналах з некруглим поперечним перерізом вторинних течій, що безперервно переносять імпульс з ядра течії в кути і тим самим викликають там збільшення швидкості [5, 6]. Для порівняння на рис. 7, б зображено ізотхи для прямокутного поперечного перерізу [6].

Картина обчислених ізотх в якісному відношенні не суперечить результатам праць інших авторів [4–6], тому можна стверджувати, що побудована числова модель течії на елементі теплообмінної поверхні з нерозрізними ребрами є працездатною, загальні принципи її побудови можуть бути використані для розробки складніших моделей.

Розрізне ребро. Формування профілю швидкості в каналах, утворених ребрами, розрізаними не по всій висоті, проходить в умовах росту пограничного шару на всій довжині нерозрізної частини ребра і його деформації в місці розрізки з наступним відновленням процесу його розвитку за розрізкою. Можна зробити припущення, що потік "прослизає" над розрізкою без збільшення товщини пограничного шару, а потім пограничний шар знову починає розвиватися по довжині "пелюстки" до місця наступної розрізки. Схему течії на розрізному ребрі можна простежити, аналізуючи рис. 8.

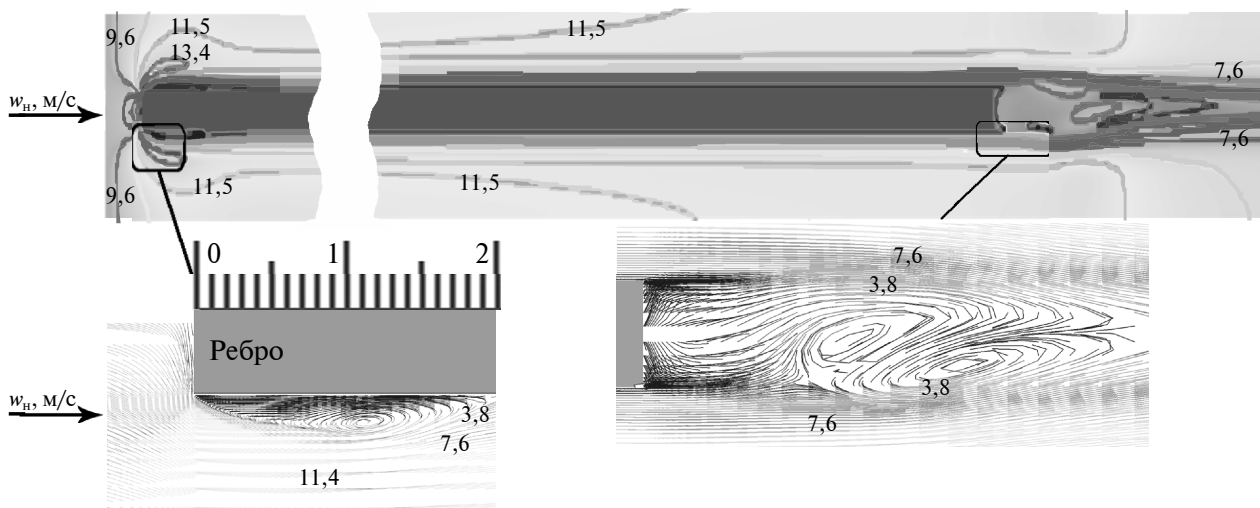


Рис. 4. Схема розподілу ізотх по довжині нерозрізного ребра

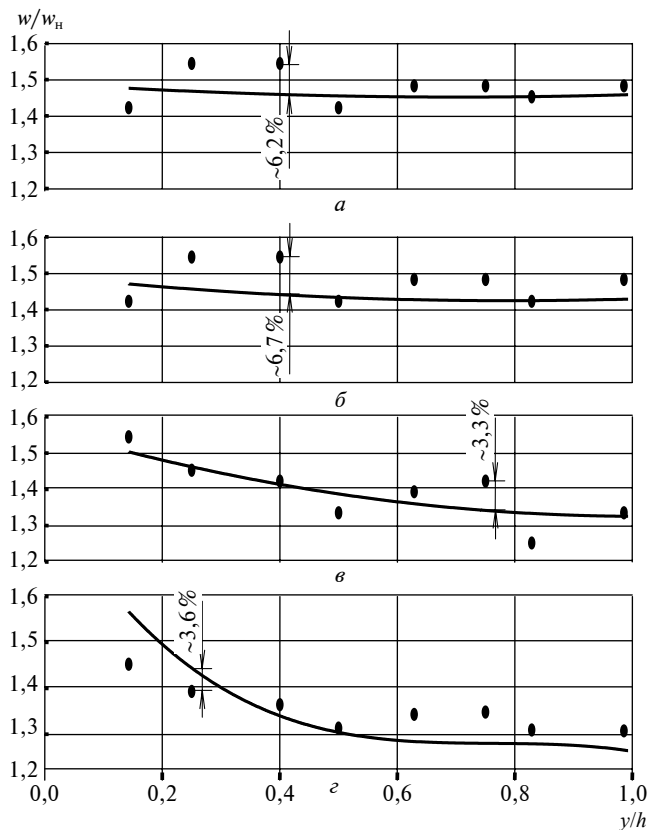


Рис. 5. Розподіл відносної швидкості по висоті нерозрізного ребра: а – $x/L = 0,75$; б – $x/L = 0,7$; в – $x/L = 0,0046$; г – $x/L = 0,0007$

На першій “пелюстці” утворюється відривний пазир, висота якого приблизно в два рази менше, ніж для випадку з нерозрізними ребрами. Цим можна пояснити той факт, що для розрізних ребер не спостерігається того значного

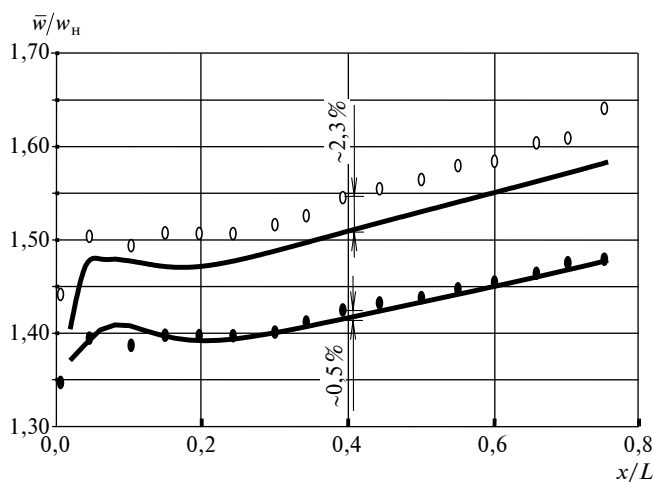


Рис. 6. Розподіл відносної осередненої по висоті ребра швидкості \bar{w}/w_H вздовж нерозрізного ребра: ● – $w_n = 10$ м/с; ○ – $w_n = 5$ м/с; — — числовий розрахунок

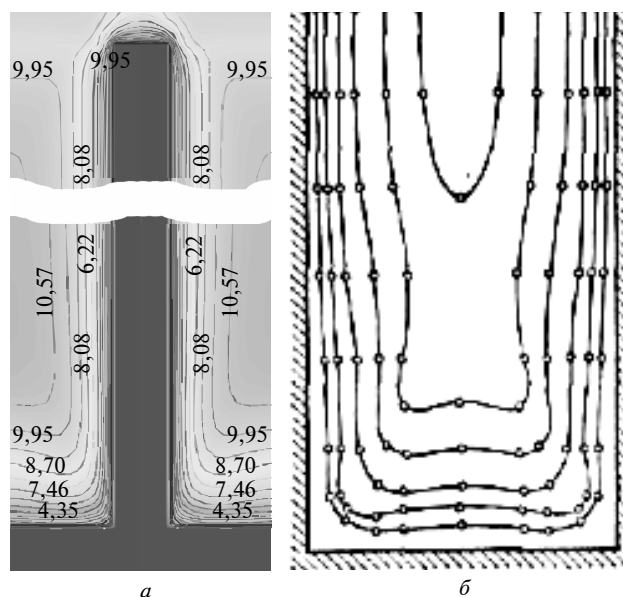


Рис. 7. Картина ізотех у кутах перетину основи і ребер дослідної поверхні (а) і (б) в каналі з прямокутним поперечним перерізом [6]

прискорення потоку в перерізах поблизу входу в міжреберний канал, як для нерозрізних ребер. Порівняння відривних пазирів, що утворюються на поверхні ребра поблизу передньої гострої кромки, показано на рис. 9.

При переміщенні потоку в каналі з розрізними стінками в місці розриву поверхні утворюються два симетричних вихори, які піджимаються основним потоком. Також видно, що перетікання речовини з одного міжреберного каналу в інший у місцях розрізки відсутні. Аналогічна картина течії спостерігається в усіх кавернах вздовж по потоку. В цілому по довжині усього розрізного ребра має місце стоншення пограничного шару порівняно з випадком течії вздовж ребер без розрізки, чим зокрема пояснюється зменшення висоти відривного пазиря біля передньої кромки ребра.

Аналіз розподілу швидкості по довжині міжреберного каналу з розрізними стінками поблизу передньої кромки ребра ($x/L = 0,007$ і $0,046$) при $h_p/h = 0,4; 0,6; 0,8$ та фіксованих значеннях u/h показав, що відхилення розрахункових даних від дослідних становить 8%. Так, як і для випадку з нерозрізними ребрами, поблизу передньої кромки ребра спостерігається характерне прискорення потоку, викликане утворенням відривних пазирів на поверхні основи та ребер, причому необхідно зауважити, що мінімальне значення швидкості спостерігається при $x/L = 0,1$. Отримані результати підтверджуються даними рис. 10–12.

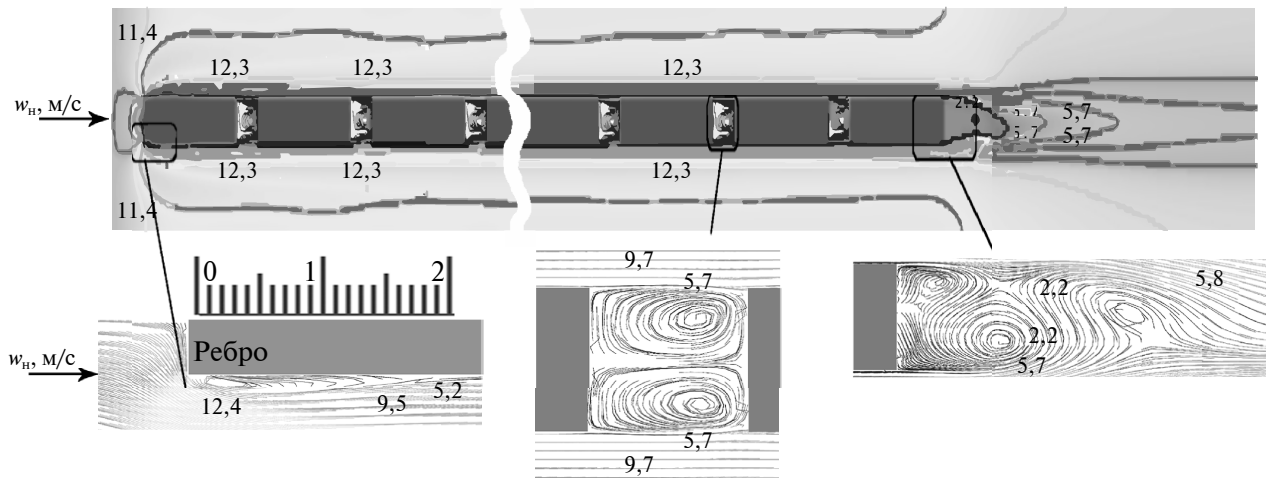


Рис. 8. Розподіл швидкості по довжині ребра з $h_p/h = 0,6$

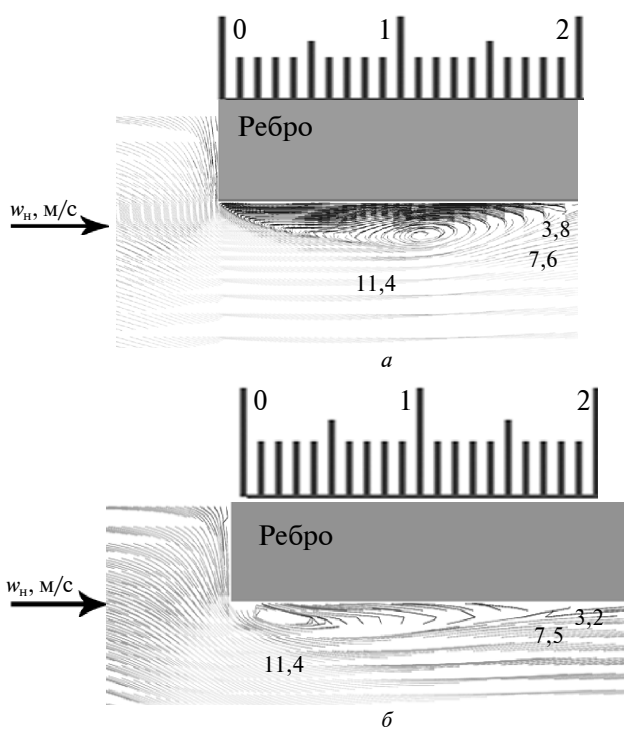


Рис. 9. Утворення відірваних пазурів на передній кромці ребер: а – при $h_p/h = 0$; б – з $h_p/h = 0,6$

Аналіз рисунків також свідчить про те, що в усіх перерізах по висоті ребра розрахункові розподіли відносної швидкості по довжині ребра мають той же характер, що і дослідні. При цьому відхилення розрахункових даних від дослідних не перевищує $\pm 10\%$. На рис. 13 наведено порівняння дослідних і розрахункових значень відносної швидкості, осе-

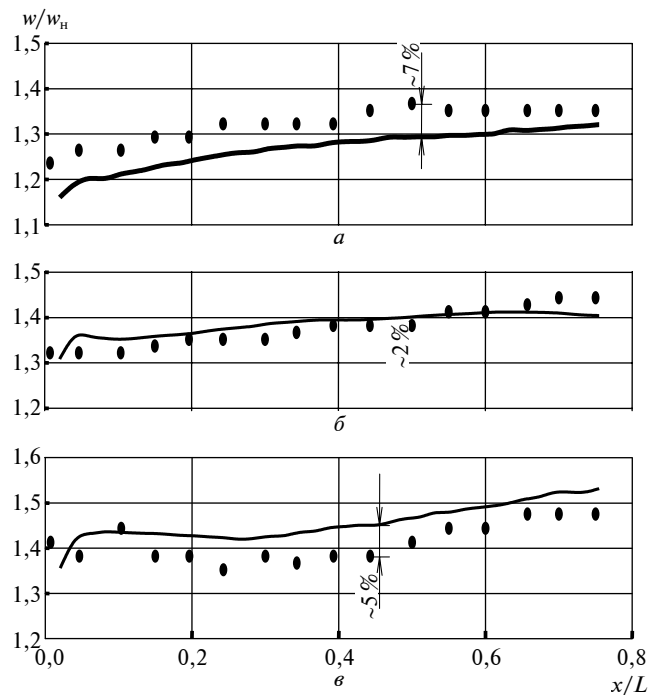


Рис. 10. Розподіл відносних швидкостей по довжині розрізного ребра з $h_p/h = 0,4$: а – $y/h = 0,99$; б – $y/h = 0,50$; в – $y/h = 0,14$

редненої по висоті ребра, для $h_p/h = 0,4; 0,6; 0,8$ вздовж ребра. Аналізуючи дані рисунка, можна зробити висновок, що зі збільшенням глибини розрізки темп прискорення потоку зменшується. Наведені на рис. 13 дані дають можливість розрахувати градієнти швидкості потоку для $h_p/h = 0,4; 0,6; 0,8$ і $d\bar{w}/dx = 11,1; 9,5; 6,4$ 1/с, відповідно.

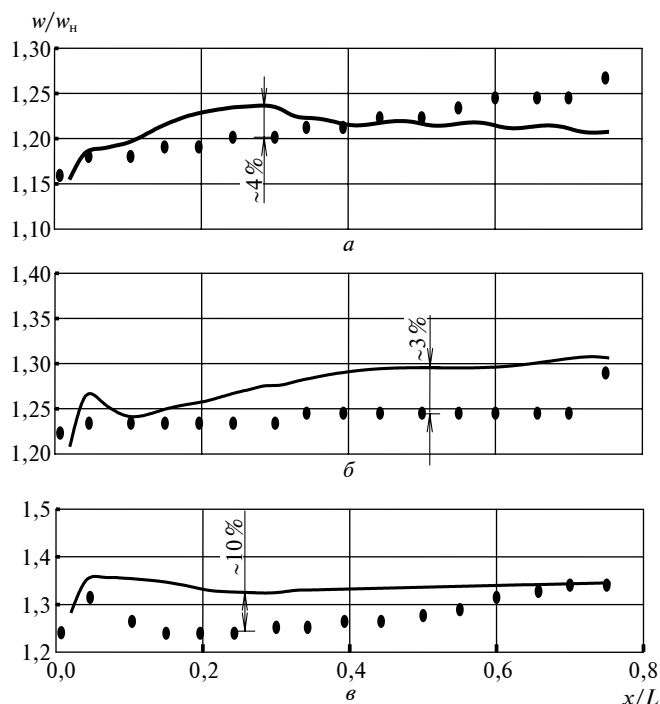


Рис. 11. Розподіл відносних швидкостей по довжині розрізного ребра з $h_p/h = 0,6$: а – $y/h = 0,99$; б – $y/h = 0,50$; в – $y/h = 0,14$

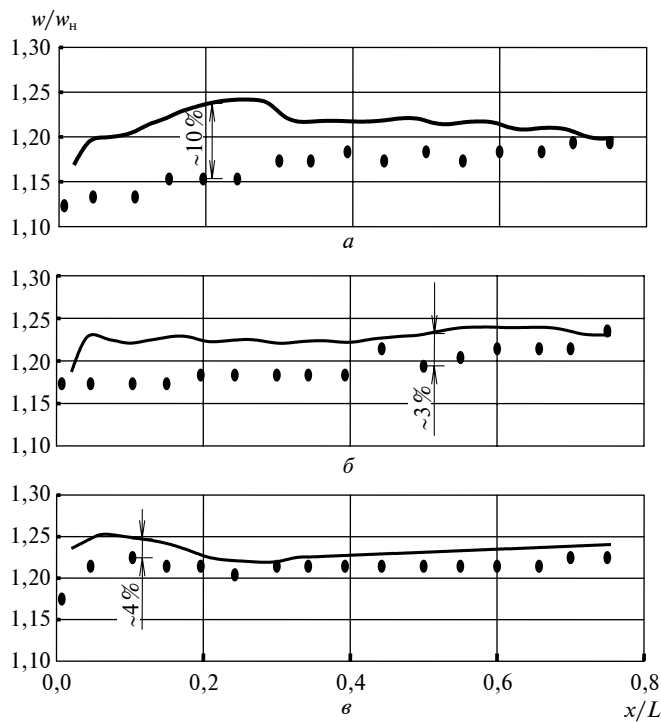


Рис. 12. Розподіл відносних швидкостей по довжині розрізного ребра з $h_p/h = 0,8$: а – $y/h = 0,99$; б – $y/h = 0,50$; в – $y/h = 0,14$

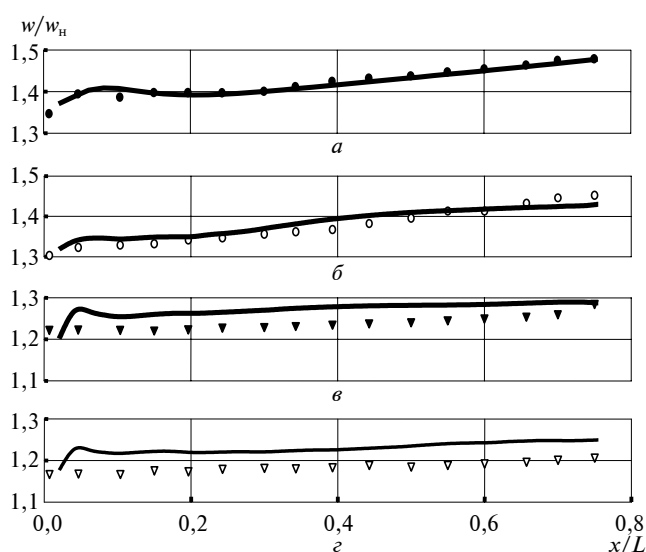


Рис. 13. Порівняння дослідних і розрахункових значень відносної осередненої по висоті ребра швидкості \bar{w}/w_H для h_p/h по довжині ребра: а – $h_p/h = 0$; б – $h_p/h = 0,4$; в – $h_p/h = 0,6$; з – $h_p/h = 0,8$

Висновки

Результати досліджень розподілів швидкості в осьовій площині по довжині міжреберних каналів теплообмінних поверхонь із пластинчасто-розрізним оребренням, отриманих за допомогою числового моделювання, підтвердили висновки [2] про те, що розрізка ребра приводить до ряду аеродинамічних ефектів і сприяє інтенсифікації теплообміну. Числове моделювання дає змогу проаналізувати особливості таких аеродинамічних ефектів, як формування локальних відривів потоку на входних кромках ребер, розвиток пограничного шару на поверхнях “пелюсток” і суцільній частині розрізного ребра, деформацію пограничного шару в місці розрізки ребер та вихроутворення в прямокутних кавернах. З аналізу цих ефектів можна зробити такі висновки:

- в міжреберних каналах, сформованих суцільними нерозрізними ребрами, в центральній площині потік прискорюється під впливом пограничних шарів, що виникають на поверхнях ребер і основи теплообмінної поверхні;
- аналіз картин ліній течії по довжині ребра свідчить, що розрізка призводить до зменшення товщини пограничного шару, який розвивається на всій поверхні ребра в міру просування потоку вглиб міжреберного каналу;
- зі збільшенням відносної глибини розрізки h_p/h відносна швидкість w/w_i зменшується; для $h_p/h = 0,4, 0,6, 0,8$ в усіх перерізах по висоті ребра w/w_i змінюються в межах 1,35–1,45, 1,2–1,35 і 1,15–1,3, відповідно.

Результати числового моделювання підтверджуються результатами експериментальних дослід-

жень, що свідчить про працездатність застосованої числової моделі. Отже, подальші дослідження, спрямовані на визначення впливу на процеси переносу таких параметрів розрізної поверх-

ні, як ширина "пелюсток", товщина ребра і кут повороту "пелюсток" відносно набігаючого потоку, можуть бути проведені за допомогою числового моделювання.

А.В. Баранюк, Е.Н. Письменный, А.В. Семеняко

ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В МЕЖРЕБЕРНЫХ КАНАЛАХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПЛАСТИНЧАТО-РАЗРЕЗНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ МЕТОДАМИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Приведены результаты численных расчетов структуры потока в полуоткрытых каналах, образованных разрезными ребрами. Численные данные с достаточной точностью подтверждаются опытными данными. Показано, что разрезка ребра приводит к возникновению аэродинамических эффектов различной природы, что способствуют интенсификации теплообмена.

O.V. Baranyuk, Ye.M. Pysmennyu, O.V. Semenyako

RESEARCH OF STREAM STRUCTURE IN THE INTERCOSTALS DUCTING FROM THE SURFACES WITH PLATE-CUTTED FINNING OF NUMERICAL DESIGN METHODS

The paper under study presents the results of numerical calculations of stream structure in the half-open ducting, formed by split ribs. Through experiments performed, the numeral data is confirmed with sufficiently high accuracy. Moreover, we demonstrate that rib cutting causes the aerodynamic effects of different nature, promoting heat exchange intensifications.

1. Письменный Е.Н., Бурлей В.Д., Терех А.М., Бурлей В.Д., Руденко А.И. Влияние разрезки, поворотов и отгибки ребер на теплоаэродинамические характеристики поверхностей теплообмена // Промышл. теплотехника. – 2003. – 25, № 1. – С. 10–16.
2. Письменный Е.Н., Бурлей В.Д., Терех А.М., Баранюк А.В., Цвященко Е.В. Теплообмен плоских пластинчатых поверхностей с разрезным оребрением при вынужденной конвекции // Там же. – 2005. – 27, № 4. – С. 11–16.
3. Письменный Е.Н., Рогачев В.А., Терех А.М., Баранюк А.В., Бурлей В.Д. Теплоаэродинамическая эффективность новых теплоотводящих поверхностей с пластинчато-разрезным оребрением // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2007. – № 1. – С. 16–21.
4. Ибрагимов М.Х., Субботин В.Н., Бобков В.П., Сабелев Г.Н., Таранов Г.С. Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах. – М.: Атомиздат, 1978. – 296 с.
5. Павловський В.Г. Особливості гідродинаміки і теплообміну в некруглих каналах. – Харків: НТУ "ХПІ", 2006. – 104 с.
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1969. – 742 с.
7. Письменный Е.Н., Эпик Э.Я., Баранюк А.В., Терех А.М., Бурлей В.Д. Структура потока в полуоткрытых плоских каналах с разрезными стенками элементов охлаждения РЭА // Промышл. теплотехника. – 2006. – 28, № 4. – С. 11–16.
8. Zhigang Li, Xiulan Huai, Yujia Tao, Huanzhuo Chen Effect of thermal property variations on the liquid flow and heat transfer in microchannel heat sinks // Applied Thermal Engineering. – 2007. – 27. – P. 2803–2814.
9. Диев М.Д., Железнякова А.Л. Компьютерное моделирование теплообмена и гидродинамики при течении воздуха в каналах с гофрами различной формы // Пробл. газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Тр. XVI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева, Санкт-Петербург, 21–25 мая 2007. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007. – Т. 2. – С. 358–361.
10. Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. – СПб.: Судостроение, 2005. – 390 с.
11. Богатко Т.В., Терехов В.И. Численное исследование интенсификации теплообмена при турбулентном обтекании одиночных диафрагм различной формы в трубе // Пробл. газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Тр. XVI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева, Санкт-Петербург, 21–25 мая 2007. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007. – Т. 2. – С. 420–423.
12. Эпик Э.Я. Проблемы прогнозирования и расчета верхнего теплового ламинарно-турбулентного перехода (проблемный доклад) // Тр. V Минского междунар. форума по тепло- и массообмену, 24–28 мая 2004. – Минск, 2004. – С. 10–15.
13. Dyban E.P., Epik E.Ya., Yushina L.E. Heat transfer on the surface of longitudinally streamlined bodies in the presence of closed separation and external flow turbulization // Heat Transfer Conf. – Brighton, UK, 1994. – 3. – P. 25–30.

Рекомендована Радою теплоенергетичного факультету НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
1 вересня 2008 року

УДК 536.423.4

М.К. Безродний, М.Н.Голіяд,
П.О. Барабаш, А.І. Дейнеко

ВИЗНАЧЕННЯ ЛОКАЛЬНОЇ ПО ДОВЖИНІ ТЕПЛОВІДДАЧІ ПРИ КОНДЕНСАЦІЇ ПАРИ R407C В ГОРИЗОНТАЛЬНІЙ ТРУБІ

Вступ

Теплоносій R407C належить до холодильних агентів, які не мають негативного впливу на озоновий шар атмосфери. Публікації, в яких висвітлюються закономірності гідродинаміки і теплообміну при конденсації пари цього холодоагента в горизонтальних трубах у доступній літературі, досить обмежені [1, 2]. Тому експериментальне визначення локальних по довжині коефіцієнтів тепловіддачі при конденсації пари R407C в таких трубах при різних режимах течії його фаз є актуальним. У запропонованій статті аналізуються дані з конденсації на початковій ділянці труби при турбулентному паровому ядрі і ламінарній плівці конденсату.

Холодоагент R407C, який є зеотропною сумішшю [3], був створений для заміни R22 з дуже близькими до нього теплофізичними властивостями (для визначення теплофізичних властивостей холодоагента ми використовували програмний пакет NIST REFPROP Ver. 6.01). Тут характерним є те, що експериментальні дані по коефіцієнту тепловіддачі при конденсації R407C, якщо його відносити до різниці насиченої і середньої температур ($t_n - \bar{t}_c$), за нашими дослідженнями та дослідженнями інших авторів [1–4] мають менші значення порівняно з даними для R22.

Постановка задачі

Метою статті є визначення підходів до розробки універсальної методики розрахунку тепловіддачі при конденсації одно- і багатокомпонентних (зеотропних) хладонів з використанням закономірностей для тепловіддачі при конденсації паро-газових сумішей, коли визначальне значення на процес має дифузія пари до поверхні конденсації через газовий прошарок.

Основні припущення для розрахунку масовіддачі

Для розгляду конденсації пари суміші R407C всередині горизонтальної гладкої труби на початковій її ділянці з турбулентним паровим ядром і ламінарною плівкою конденсату зробимо такі припущення.

1. Температура пари суміші має дорівнювати температурі парової фази кожного з трьох її компонентів.

2. Два компоненти пари суміші (R32 і R125) перебувають через свої теплофізичні властивості в перегрітому стані і при вказаних умовах не конденсуються і віддають незначну кількість теплоти плівці конденсату конвекцією, перешкоджаючи таким чином доступу парової фази компонента R134A, що конденсується, до внутрішньої поверхні труби і зменшуючи його парціальний тиск біля поверхні плівки.

3. Парціальний тиск R134A в ядрі парового потоку прирівнюється до його тиску насичення при температурі суміші, а відношення парціальних тисків пари R32 і R125, згідно з відношенням їх мольних часток (без врахування мольної частки R134A), дорівнює приблизно 2:1 (як рекомендується програмним пакетом NIST REFPROP Ver. 6.01 при сухості пари $x = 0$ і $x = 1$).

4. Вважається, що між процесами тепло- і масовіддачі виконується наближена аналогія (немає хімічних реакцій і значної дисипації кінетичної енергії та внутрішніх джерел теплоти; мало змінюються температура і тиск в ядрі потоку та його фізичні властивості). Процеси відбуваються в одній геометричній системі і задаються однакові граничні умови (зберігається постійна концентрація компонента на межі розподілу фаз і постійна температура стінки [5]).

5. Використовується узагальнююча залежність для тепловіддачі при конденсації пари R22 всередині горизонтальної труби на початковій її ділянці з турбулентним паровим ядром і ламінарною плівкою конденсату [6] для отримання (із врахуванням припущення про аналогію процесів) залежності для визначення коефіцієнта масовіддачі при конденсації пари R134A із зеотропної суміші R407C, яка набуває такого вигляду:

$$\frac{\beta}{D} \left(\frac{v^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}} = 1,36 C_f^{0,5} \left(\frac{\rho_n (\rho - \rho_n) W_n^2}{\rho^2 (vg)^{\frac{2}{3}}} \right)^{0,5} \left(\frac{4qz}{r\rho v} \right)^{-0,5}, \quad (1)$$

де β – коефіцієнт масовіддачі, віднесений до різниці концентрацій компонента; D – коефіцієнт дифузії; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості; g – прискорення вільного падіння; C_f – коефіцієнт тертя; ρ, ρ_p – густина відповідно рідини і пари; W_p – швидкість пари; q – густина теплового потоку; z – поздовжня координата труби; r – питома теплота пароутворення; відповідні параметри приймаються для суміші при її температурі в ядрі потоку.

6. Вважається, що коефіцієнт дифузії D практично не залежить від складу суміші [7] і тому буде приблизно дорівнювати бінарному коефіцієнту дифузії для суміші парових фаз R134A–R32, який визначається за формулою [7]

$$D = \frac{0,01T^{1,75} \left(\frac{1}{M_{R32}} + \frac{1}{M_{R134A}} \right)^{0,5} P^{-1}}{10^4 \left[\left(\sum V_k \right)_{R32}^{\frac{1}{3}} + \left(\sum V_k \right)_{R134A}^{\frac{1}{3}} \right]^2}, \quad (2)$$

де T – температура суміші, К; M_i – молекулярна маса відповідних компонентів, кг/кмоль; P – сума парціальних тисків R134A і R32, Па; $\left(\sum V_k \right)_{R32} = 49,68 \cdot 10^{-6}$ і $\left(\sum V_k \right)_{R134A} = 93,42 \cdot 10^{-6}$ – мольні об'єми відповідних компонентів, м³/кмоль.

7. Коефіцієнт масовіддачі пари R134A, віднесений до різниці парціальних тисків в ядрі потоку і біля поверхні плівки β_p , має приблизно такий вигляд [5]:

$$\beta_p \approx \frac{\beta M_{R134A}}{8314T}. \quad (3)$$

8. Рівняння, яке використовується для визначення парціального тиску біля поверхні плівки, має вигляд [5]

$$q = r\beta_p(p_{п.о} - p_{п.гр}), \quad (4)$$

де $p_{п.о}$, $p_{п.гр}$ – відповідно парціальні тиски в ядрі потоку і біля поверхні плівки.

Залежності (1)–(4) дають можливість знайти ефективний коефіцієнт тепловіддачі, віднесений до різниці температур біля поверхні плівки і стінки $\Delta T = T_{п.гр} - T_{ст}$, таким чином, для експериментальних значень q і знайдених за фор-

мулою (3) β_p із використанням (4) знаходиться температура біля поверхні плівки $T_{п.гр} = f(p_{п.гр})$. Ефективний коефіцієнт визначається залежністю

$$\alpha_{т.м} = \frac{q_{експ}}{T_{п.гр} - T_{ст}}. \quad (5)$$

Методика експериментального дослідження

Експериментальне визначення локального коефіцієнта тепловіддачі при конденсації пари R407C, віднесене до різниці температур $(T_n - \bar{T}_c)$, проводилося за допомогою градієнтного методу дослідження теплообміну в каналах [8].

Локальні теплові потоки q і коефіцієнти тепловіддачі α вимірювалися на ділянці товстостінної труби з нержавіючої сталі з внутрішнім діаметром 0,017 м, зовнішнім діаметром 0,08 м і завдовжки 0,08 м (робоча ділянка). Робоча ділянка разом із ділянкою завдовжки 0,7 м, що розмішувалася перед нею і задавала відповідний режим течії фаз, мали одну поздовжню вісь і охолоджувалися водою незалежно одна від одної. На радіусах $R_1 = 0,0115$ м і $R_3 = 0,037$ м в стінці робочої ділянки на відстані 0,047 м від вхідного її торця закладались (в отвори, що були зроблені на координатно-розточувальному верстаті) по п'ять хромель-копелевих термопар (в точках з $\varphi = 0; \pi/4; \pi/2; 3\pi/4; \pi$) з діаметром електродів 0,15 мм кожна.

Методика обробки результатів вимірювання для отримання локальних q і α з використанням розв'язку двовимірного рівняння Лапласа докладно викладена в статті [8]. Тут же наводяться лише залежності для визначення:

локального по довжині труби і середнього по перерізу питомого теплового потоку \bar{q}_φ :

$$\bar{q}_\varphi = \frac{\lambda(\bar{T}_{R=0,0115} - \bar{T}_{R=0,037})}{\ln\left(\frac{0,037}{0,0115}\right)R_B};$$

локального по довжині труби і середнього по перерізу коефіцієнта тепловіддачі $\bar{\alpha}_\varphi$:

$$\bar{\alpha}_\varphi = \frac{\bar{q}_\varphi}{T_n - T_c};$$

середньої по периметру поперечного перерізу температури внутрішньої поверхні труби \bar{T}_c :

$$\bar{T}_c = \bar{T}_{R=0,0115} + \frac{\bar{q}_\varphi R_B \ln\left(\frac{0,0115}{R_B}\right)}{\lambda}$$

У цих формулах $\bar{T}_{R=0,0115}$, $\bar{T}_{R=0,037}$, T_H – відповідно середньоінтегральні значення температури при $R_1 = 0,0115$ м і $R_3 = 0,037$ м та температура насичення, К; λ – коефіцієнт теплопровідності стінки, Вт/(м·К); R_B – внутрішній радіус труби, м.

Коефіцієнт тепловіддачі з боку охолодження внаслідок використання як теплоносія води в кілька разів був більшим, ніж з боку конденсації. Тому температура стінки T_3 на радіусі $R_3 = 0,037$ м була постійною при постійній координаті φ для всіх поданих нижче дослідів.

Температура насичення вимірювалась за допомогою термопари, що була встановлена біля контрольного перерізу і оцінювалась також по тиску безпосередньо за робочою ділянкою. Середня квадратична похибка у визначенні величини локального коефіцієнта тепловіддачі становила 39,6 Вт/(м²·К) з достовірністю 0,95. Баланс по теплу між нагріванням води, якою охолоджувались згадані ділянки і конденсатор, та кількістю конденсату, який при цьому утворювався, схилювався задовільно, не перевищуючи ± 10 %.

Результати експериментального дослідження

Досліди при конденсації пари суміші R407C в горизонтальній трубці на початковій її ділянці з турбулентним паровим ядром і ламінарною плівкою конденсату проводилися при змінюванні: температури насичення пари суміші від 20,7 до 40,7 °С, тиску пари суміші – від 1,03 до 1,71 МПа, швидкості пари в перерізі вимірювання температур стінки робочої ділянки – від 1,84 до 4,9 м/с, числа Рейнольдса парового потоку $Re_n = 2W_n R_B / \nu_n$ – від 101083 до 421008, числа Рейнольдса плівки $Re = 4qz / (r\rho\nu)$ – від 18,3 до 276,1. При цьому діапазон зміни питомої щільності теплового потоку q становив (2950–29845)Вт/м².

На рис. 1 наведено графіки розподілу температури t (°С) в стінці робочої ділянки на ра-

діусах R_1 і R_3 по кутовій координаті φ (рад) для двох режимів конденсації пари R407C.

Видно, що при $R = \text{const}$ для всього діапазону зміни режимних параметрів $t = f(\varphi)$ є практично константою, а це дає можливість стверджувати, що режим течії конденсату кільцевий, а температура внутрішньої поверхні труби по координаті φ теж постійна.

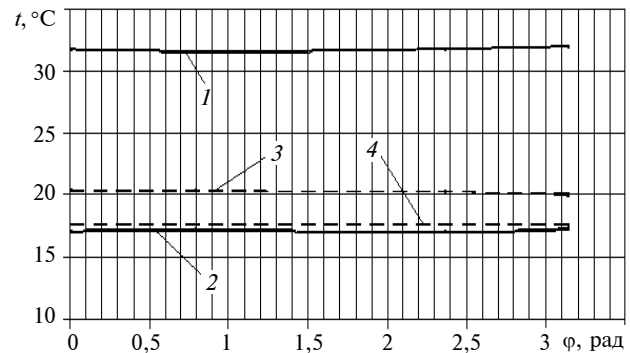


Рис. 1. Розподіл температури в стінці робочої ділянки на радіусі $R_1 = 0,0115$ м (лінії 1, 3) і радіусі $R_3 = 0,037$ м (лінії 2, 4) по координаті φ : 1, 2 – температура насичення $t_H = 40,6$ °С, швидкість пари $W_n = 4,85$ м/с, питома щільність теплового потоку $q = 22103$ Вт/м²; 3, 4 – $t_H = 22,3$ °С, $W_n = 1,84$ м/с, $q = 4035$ Вт/м²

Експериментальні значення коефіцієнта тепловіддачі при конденсації пари суміші R407C всередині горизонтальної труби на початковій її ділянці в обробці $A = \alpha(v^2/g)^{1/3} / (\lambda C_f^{0,5} Fr^{0,5}) = f(Re)$ (α – локальний коефіцієнт тепловіддачі; λ – коефіцієнт теплопровідності; $Fr = \rho_n(\rho - \rho_n)W_n^2 / (\rho^2(vg)^{2/3})$ – модифікований критерій Фруда) наведені на рис. 2.

З рис. 2 видно, що експериментальні значення комплексу A при віднесенні коефіцієнта тепловіддачі до різниці температур $(t_H - \bar{t}_c)$ (t_H, \bar{t}_c – відповідно температури насичення і середня температура внутрішньої стінки труби) при конденсації пари R407C (маркер 2) в середньому на 40 % нижче його відповідних значень при конденсації R22 (маркер 1), які були отримані і узагальнені (графік 5) в [6]. Діапазон змінювання $t_H = (23,3–39,5)$ °С, $W_n = (1,9–3,6)$ м/с, $Re_n = (111000–295000)$, Re і $q = (3760–25130)$ Вт/м² в досліді [6] був майже такий, як і при конденсації R407C.

Відзначимо, що, наприклад, для $t_n = 30^\circ\text{C}$ ρ'', μ'', r мають для R407C і R22 однакові значення (μ – динамічний коефіцієнт в'язкості; ρ'' і μ'' – параметри рідини відповідно при паровмістості $x = 0$ і $x = 1$). Відмінність таких величин, як ρ', h', h'' (h – ентальпія), λ', v' не перевищує 5 % (числа Прандтля $Pr = 5,7$ %). І тільки відмінність σ становить 15,6 %, λ'' – 16,5 %, c'_p і c''_p відповідно 18 і 22,5 % (σ – коефіцієнт поверхневого натягу; c_p – питома теплоємність). Інтенсивність тепловіддачі для задачі, що розглядається, визначається теплопровідністю і товщиною плівки конденсату. Розрахунки показують, що $\alpha_{R407C} \approx \alpha_{R22}$ для вказаних умов.

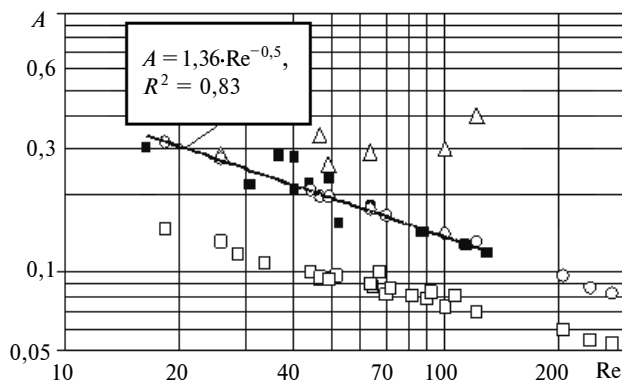


Рис. 2. Узагальнення даних з тепловіддачі при конденсації R407C: ■ – експериментальні значення для R22 [6]; □ – експериментальні значення для R407C; △ – експериментальні значення для R407C із врахуванням масовіддачі за формулами (1)–(4); ○ – те ж саме із врахуванням масовіддачі за формулами (2)–(4), (8); — – графік узагальнення тепловіддачі при конденсації пари R22 [6]

Експериментальні значення α_{R407C} із врахуванням масовіддачі за формулами (1)–(4) (маркер 3, рис. 2) при зростанні Re значно перевищують значення α_{R22} (маркер 1), що були подані у звіті [6]. Мабуть, тут дається взнаки неврахування в (1) впливу на коефіцієнт дифузії D_T турбулентності потоку. Дійсно, при таких значеннях Re_n дифузійний пограничний шар однозначно є турбулентним і поперечна складова густини потоку маси відповідного компонента суміші має вигляд [5]

$$J = -\rho(D + D_T) \frac{\partial m_i}{\partial R} = -\rho D \left(1 + \frac{D_T}{D}\right) \frac{\partial m_i}{\partial R} = -\rho D k_T \frac{\partial m_i}{\partial R},$$

де k_T – коефіцієнт, який показує вплив на коефіцієнт молекулярної дифузії турбулентності потоку; m_i – маса i -го компонента суміші, кг; R – радіус труби.

До речі, вибіркова перевірка достовірності значень D , отриманих за формулою (2), порівнянням розрахункових значень коефіцієнта дифузії з експериментальними [5] для CH_4 , H_2 , H_2O в повітрі показала цілковиту придатність (2); значення D для R134A на два порядки менше від таких для CH_4 , H_2 , H_2O в повітрі через значно більші для R407C значення молекулярних мас і мольних об'ємів відповідних компонентів; тоді залежність (1) набуває вигляду

$$\frac{\beta}{D} \left(\frac{v^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}} = 1,36 k_T C_f^{0,5} \left(\frac{\rho_n (\rho - \rho_n) W_n^2}{\rho^2 (vg)^{\frac{2}{3}}}\right)^{0,5} \left(\frac{4qz}{r\rho v}\right)^{-0,5}. \quad (8)$$

Врахування k_T (змінюється в діапазоні від 1 до 2,37) здійснювалося розрахунками за формулами (2)–(4), (8) методом послідовних наближень при умові $\alpha_{R407C} = \alpha_{R22}$ (маркер 4).

На рис. 3 в координатах $A_1 = \beta(v^2/g)^{1/3} / (DC_f^{0,5} Fr^{0,5}) = f(Re)$ представлені результати розрахунку масовіддачі при конденсації суміші R 407C всередині горизонтальної труби на початковій її ділянці з турбулентним паровим ядром і ламінарною плівкою конденсату.

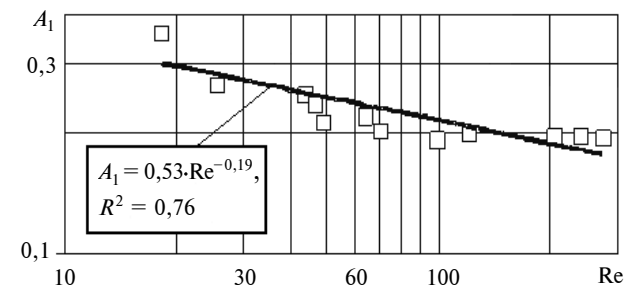


Рис. 3. Узагальнення даних за масовіддачею при конденсації R407C: — – узагальнююча лінія; □ – експериментальні дані

Видно, що розраховані за експериментальними даними значення коефіцієнта масовіддачі задовільно апроксимуються рівнянням

$$\frac{\beta}{D} \left(\frac{v^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,53 C_f^{0,5} Fr^{0,5} Re^{-0,19}. \quad (9)$$

Коефіцієнт тертя C_f визначаємо таким чином [9, 10]:

$$C_f = C_{дв} \frac{(1 - 0,25b)^2}{(1 + 0,25b)^{0,2}}, \quad b = -\frac{2J}{C_{дв}}, \quad J = \frac{q}{r \rho_n W_n},$$

$$C_{дв} = C_{f0} \left(1 + 150 \frac{\delta}{R_B} \right), \quad C_{f0} = \frac{\xi}{4}.$$

При $10 < Re_n \frac{\Delta_{екв}}{D_B} < 500$ маємо $\xi = 0,11 \left(\frac{\Delta_{екв}}{D_B} + \frac{68}{Re_n} \right)^{0,25}$, при $Re_n \frac{\Delta_{екв}}{D_B} > 500$ – $\xi = \frac{1}{4 \left(\log \frac{3,7 D_B}{\Delta_{екв}} \right)^2}$, де δ – товщина плівки; R_B , D_B – внутрішній радіус і діаметр труби; $\Delta_{екв}$ – еквівалентна шорсткість труби.

Функціональна залежність $Nu_D = \beta(v^2/g)^{1/3}/$

$D = f(Re^{-0,19})$ в (9) побічним чином підтверджує правильність нашого припущення про існування при даних умовах турбулентного дифузійного пограничного шару [6] (визначальна температура – температура пари в ядрі потоку).

Висновки

Зниження інтенсивності тепловіддачі при конденсації хладону R407C в горизонтальній гладкій трубі на початковій ділянці порівняно з аналогічним процесом для хладону R22 можна пояснити наявністю дифузійного пограничного шару в паровій фазі біля поверхні плівки конденсату.

Наведений підхід дає змогу визначити інтенсивність тепловіддачі при конденсації R407C в горизонтальній трубі при наявності узагальнюючих залежностей для тепловіддачі при конденсації R22.

Перспективою для подальших досліджень є підтвердження отриманих результатів на інших багатокомпонентних хладонах та створення універсальної методики розрахунку тепловіддачі при конденсації таких речовин.

М.К. Безродный, М.Н. Голияд, П.О. Барабаш, А.И. Дейнеко

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ПО ДЛИНЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА R407C В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЕ

Рассмотрено влияние массоотдачи на локальную теплоотдачу по длине гладкой горизонтальной трубы при конденсации в ней смеси R407C. При определенных допущениях проведен расчет массоотдачи компонента R134A при конденсации пара R407C. Снижение интенсивности теплоотдачи при конденсации хладона R407C на начальном участке в сравнении с аналогичными условиями для R22 объясняется наличием диффузионного пограничного слоя возле поверхности пленки конденсата. Приведено методику расчета коэффициента теплоотдачи при конденсации R407C.

M.K. Bezrodny, M.N. Goliyad, P.O. Barabash, A.I. Deyneko

THE DETERMINATION OF THE LOCAL ON THE HEAT TRANSFER LENGTH AT CONDENSATION VAPOR R407C IN A HORIZONTAL PIPE

This paper reports on the influence of mass transfer on local heat transfer on the length of a smooth horizontal pipe at inside condensation mixture R407C. Moreover, we make the calculation of mass transfer component R134A at condensation vapor R407C, taking into account certain assumptions. We illustrate that the presence of the diffusion boundary layer near the surface of condensate film causes the decrease in the intensity of heat transfer at condensation refrigerant R407C on the initial site, comparing with the similar conditions for R22. We also propose the design procedure of heat transfer coefficient at condensation R407C.

1. *Eckels S.J., Tezene B.A.* A Comparison of R-22, R-134a, R-410A and R-407C Condensation Performance in Smooth and Enhanced Tubes. Part 1: Heat Transfer // ASHRAE Trans. – 1991. – **105**, Pt. 2. – P. 428–441.
2. *Cavallini A. et al.* Analysis and Prediction of Condensation Heat Transfer of the Zeotropic Mixture R-125/236ea // Proc., IMECE 00, Orlando, Florida, ASME HTD. – 2000. – **366-4**. – P. 103–110.
3. *Бабакин Б.С., Стефанчук В.И., Ковтунов Е.Е.* Альтернативные хладагенты и сервис холодильных систем на их основе. – М.: Колос, 2000. – 160 с.
4. *Koyama S., Lee S.-M.* Prediction Method of In-tube Condensation of Multi-component Vapor Mixture // The Reports of Institute of Advanced Material Study. – Kyushu University. – 1997. – **11**, N 2. – P. 113–119.
5. *Теплотехнический справочник.* Т. 2 / Под общ. ред. В.Н. Юренева, П.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1976. – 896 с.
6. *Безродний М.К., Барабаш П.О., Голяд М.Н. та ін.* Звіт про НДР “Дослідження гідродинаміки та теплообміну при конденсації парів альтернативних холодоагентів в горизонтальних гладких трубах”, Номер держ. реєстр. 0106U002430. – К., 2007. – 161 с.
7. *Александров И.А.* Массопередача при ректификации и абсорбции многокомпонентных смесей. – Л.: Химия, 1975. – 320 с.
8. *Дейнеко А.І., Гончаренко А.А., Барабаш П.О., Голяд М.Н., Горін В.В.* Метод товстостінної труби при дослідженні конденсації в трубах // Вісн. інженерної академії. – 2008. – № 1. – С. 97–101.
9. *Риферт В.Г., Сардак А.И., Тобилевич А.Н.* Режимы течения фаз и теплообмен при конденсации пара внутри горизонтальных труб // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1985. – № 4. – С. 101–109.
10. *Справочник по гидравлике /* Под. ред. В.А. Большакова. – К.: Вища шк., 1984. – 344 с.

Рекомендована Радою
теплоенергетичного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
23 червня 2008 року

УДК 621.311

І. Зіа, Т.Ю. Курач

АНАЛІЗ САМОЗАПУСКУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГИ В ЕНЕРГОСИСТЕМІ**Вступ**

Характерною особливістю розвитку електроенергетики є нарощування потужностей, зумовлене ростом економіки країни. У цих об'єктивно існуючих умовах першочерговою задачею є підтримання на необхідному рівні показників безвідмовності і довговічності обладнання.

За умов інтенсивного споживання електроенергії виникає необхідність у підвищенні експлуатаційної надійності компонентів електричної станції. Одним із найбільш важливих та відповідальних елементів електричної установки є асинхронний двигун.

Проблема підвищення експлуатаційної надійності асинхронних двигунів має першочергове значення, адже вони прямо впливають на основне обладнання технологічного процесу виробництва. Експлуатаційна надійність асинхронного двигуна залежить не тільки від старіння з часом його елементів, але й від режиму енергосистеми, зокрема від ступеня несиметрії напруги, яка підводиться до асинхронного двигуна, а також від можливості забезпечення самозапуску двигунів при короткочасному зникненні або зниженні напруги.

В енергосистемі можлива поява несиметричних режимів, зумовлених нерівномірним розподілом енергоспоживачів по фазах, а також виникнення режимів поздовжньої несиметрії [1]. Струми оберненої послідовності, що появляються за цих режимів, в режимі самозапуску призводять до виникнення від'ємного обертового моменту, який впливає на умови самозапуску двигуна. Тому задача оцінки впливу несиметрії напруги в енергосистемі на самозапуск асинхронного двигуна є актуальною.

Аналізу самозапуску асинхронних двигунів присвячено велику кількість праць [1–3] та ін. Однак в усіх цих публікаціях дослідження самозапуску двигунів проводилося за умови збереження симетрії напруги в енергосистемі.

Постановка задачі

Метою статті є розробка математичної моделі і алгоритму розрахунку самозапуску асинхронного двигуна (АД) при несиметричному режимі, програмна реалізація запропонованого методу та алгоритму (в програмному середовищі MatLab), що дає можливість оперативному персоналу приймати більш ефективні та обгрунтовані рішення щодо експлуатації двигунів.

Модель асинхронного двигуна

Для аналізу електромеханічних перехідних процесів асинхронного двигуна значного поширення дістала модель у формі ЕРС, яка враховує перехідні процеси в обмотці ротора [2]:

$$U_d = e'_d - x'_s i_q,$$

$$U_q = e'_q - x'_s i_d,$$

$$\frac{de'_d}{dt} = -\frac{1}{T_{d1}} e'_d - S e'_q \frac{N}{T_{d1}} i_q,$$

$$\frac{de'_q}{dt} = -\frac{1}{T_{d1}} e'_q - S e'_d \frac{N}{T_{d1}} i_q,$$

$$T_j \frac{ds}{dt} = m_e - m_c,$$

де U_d, U_q – складові напруги по поздовжній і поперечній осях; i_d, i_q – складові струмів статора по поздовжній і поперечній осях; e'_d, e'_q – перехідні ЕРС по поздовжній та поперечній осях; T_{d1} – стала часу обмотки ротора; m_e – електромагнітний момент двигуна; m_c – момент опору механізму; $N = x_s - x'_s$; x'_s – перехідний опір двигуна; x_s – синхронний опір двигуна; T_j – стала інерції двигуна; S – ковзання двигуна.

Алгоритм розрахунку самозапуску асинхронних двигунів при несиметрії напруги в системі

Самозапуск групи АД розглянемо за схемою, наведеною на рис. 1. На рисунку: E_1, E_2 – ЕРС відповідно прямої і оберненої послідовності енергосистеми; \dot{U}_1, \dot{U}_2 – еквівалентні напру-

ги прямої і оберненої послідовностей; $x_{вн}$ – внутрішній опір двигуна; АД₁, ..., АД_n – асинхронні двигуни.

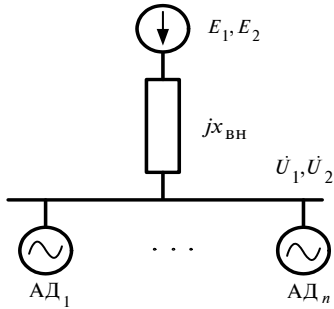


Рис. 1. Схема електропостачання асинхронних двигунів

Відповідно до схеми електропостачання АД введемо спрощену схему заміщення прямої послідовності АД [3] (рис. 2).

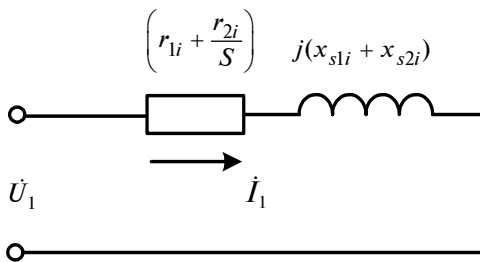


Рис. 2. Схема заміщення прямої послідовності асинхронного двигуна

Еквівалентний опір прямої послідовності *i*-го двигуна становить

$$\dot{Z}_{двi1} = \left(r_{1i} + \frac{r_{2i}}{S} \right) + j(x_{s1i} + x_{s2i}),$$

де r_{1i}, r_{2i} – активний опір прямої і оберненої послідовностей; x_{s1i}, x_{s2i} – синхронний опір прямої і оберненої послідовностей. Тут і далі індексами “1” і “2” позначаються відповідно пряма і обернена послідовності.

Для двигунів, приєднаних до шин, еквівалентний опір прямої послідовності визначається з виразу

$$\dot{Z}_{eдв1} = \frac{1}{\frac{1}{\dot{Z}_{дв11}} + \dots + \frac{1}{\dot{Z}_{двn1}}} = r_{eдв1} + jx_{eдв1},$$

а еквівалентний опір всієї схеми прямої послідовності – з формули

$$\dot{Z}_{e1} = r_{eдв1} + j(x_{вн} + x_{eдв1}).$$

Тоді напруга прямої послідовності на шинах приєднання двигунів становитиме

$$\dot{U}_1 = E_1 \frac{Z_{eдв1}}{Z_{e1}} = U'_1 + jU''_1,$$

де модуль напруги прямої послідовності матиме вигляд

$$U_1 = \sqrt{(U'_1)^2 + (U''_1)^2}.$$

Розглянемо тепер схему заміщення оберненої послідовності двигуна (рис. 3).

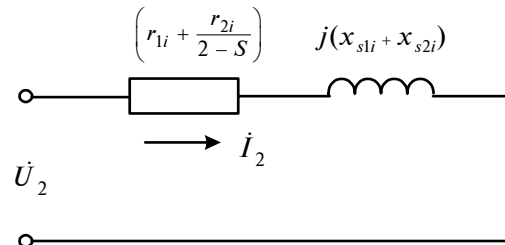


Рис. 3. Схема заміщення оберненої послідовності асинхронного двигуна

Опір оберненої послідовності *i*-го двигуна обчислюється з виразу

$$\dot{Z}_{двi2} = \left(r_{1i} + \frac{r_{2i}}{2-S} \right) + j(x_{s1i} + x_{s2i}),$$

а еквівалентний опір – за формулою

$$\dot{Z}_{eдв2} = \frac{1}{\frac{1}{\dot{Z}_{дв12}} + \dots + \frac{1}{\dot{Z}_{двn2}}} = r_{eдв2} + jx_{eдв2}.$$

Тоді еквівалентний опір оберненої послідовності всієї схеми становить

$$\dot{Z}_{e2} = r_{eдв2} + j(x_{вн} + x_{eдв2}).$$

Напруга оберненої послідовності на шинах приєднання двигунів знаходиться за формулою

$$\dot{U}_2 = E_2 \frac{Z_{eдв2}}{Z_{e2}} = U'_2 + jU''_2,$$

а модуль напруги оберненої послідовності – у вигляді

$$U_2 = \sqrt{(U'_2)^2 + (U''_2)^2}.$$

Знаючи напруги прямої і оберненої послідовності на шинах двигуна, можна визначити електромагнітні моменти прямої і оберненої послідовності [3, 4]:

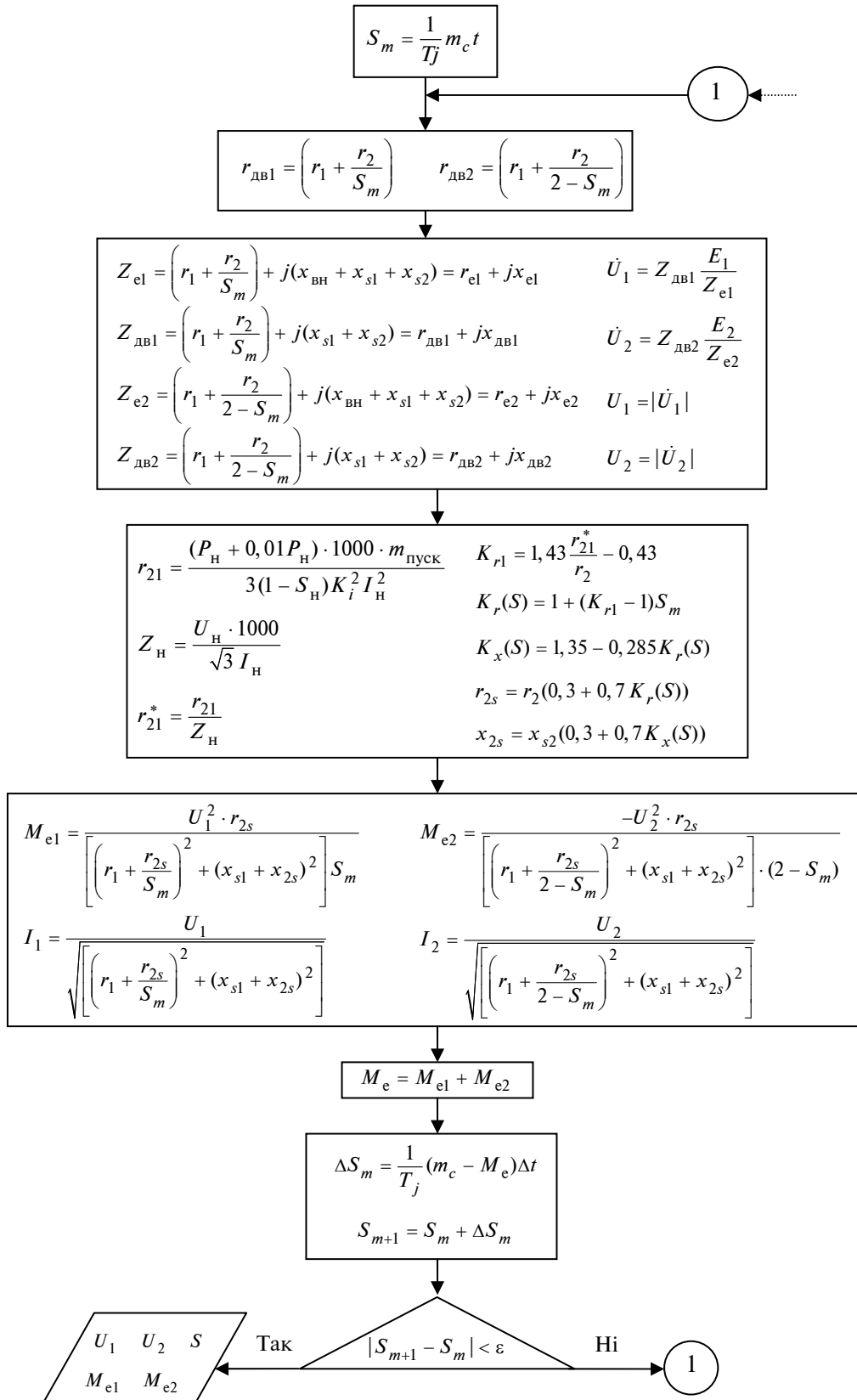


Рис. 4. Алгоритм розрахунку самозапуску АД при несиметрії напруги в енергосистемі

$$m_{e1} = \frac{U_1^2 \cdot r_2}{\left[\left(r_1 + \frac{r_2}{S} \right)^2 + (x_{s1} + x_{s2})^2 \right] S},$$

$$m_{e2} = - \frac{U_2^2 \cdot r_2}{\left[\left(r_1 + \frac{r_2}{2-S} \right)^2 + (x_{s1} + x_{s2})^2 \right] (2-S)}.$$

Для розв'язання диференціального рівняння двигуна

$$T_j \frac{ds}{dt} = m_c - m_e,$$

де $m_e = m_{e1} + m_{e2}$, використовується метод послідовних інтервалів.

Відповідно до розглянутого методу розроблений алгоритм розрахунку самозапуску асинхронного двигуна при несиметрії напруги в енергосистемі наведено на рис. 4.

Даний алгоритм покладено в основу програми розрахунку самозапуску асинхронного двигуна, що має такі можливості:

- розрахунок самозапуску асинхронного двигуна проводиться в умовах несиметрії напруги в енергосистемі;
- у програмі враховується ефект витиснення струму в обмотці ротора, тобто проводиться корекція активного і реактивного опору обмотки ротора залежно від ковзання;
- момент опору механізму вважається незмінним.

Приклади

Кількісна оцінка впливу несиметрії напруги в енергосистемі на самозапуск АД. Як приклад розглянемо двигун А-114-6, що має такі параметри: $D = 0,59$ м, $l = 0,3$ м, $\alpha = 409$ Вт/см²·град, $P_H = 200$ кВт, $U_H = 6$ кВ, $I_H = 23,5$ А, $\cos \phi = 0,87$, $n_H = 985$ об/хв, $\eta_H = 0,905$, $K_i = 6,3$, $m_{\text{пуск}} = 1,5$, $m_{\text{max}} = 2,6$, $S_H = 0,015$, $x_{s1} = 0,079$, $r_1 = 0,015$, $x_{s2} = 0,1239$, $r_2 = 0,015$.

Вплив несиметрії напруги в енергосистемі на режим самозапуску асинхронного двигуна А-114-6 розглянемо на основі серії розрахунків, виконаних за розробленою програмою розрахунку самозапуску двигунів. Час перерви живлення становить $t_{\text{пер}} = 1,2$ с, стала інерції двигуна $T_j = 4$ с, $m_c = \text{const}$. Крок інтегрування прийемо таким: $\Delta t = 0,05$ с.

Розрахунок 1. Розглядається режим самозапуску за умови симетрії напруги в енергосистемі. ЕРС системи становить $E_a = 1,05$, внутрішній опір $x_{\text{вн}} = 0,05$.

Графіки зміни характеристик двигуна зображено на рис. 5.

Аналіз режиму показує, що самозапуск проходить успішно, час самозапуску становить $t_{c.3} = 2,5$ с.

Розрахунок 2. Режим самозапуску двигуна при несиметрії напруги в енергосистемі має такі параметри: $E_a = 1,05$, $E_b = 0,9$, $E_c = 0,85$, $x_{\text{вн}} = 0,05$. Графіки зміни характеристик режиму зображено на рис. 6.

Самозапуск відбувається успішно, час самозапуску: $t_{c.3} = 3,8$ с.

Розрахунок 3. Режим самозапуску двигуна за умови симетрії напруги в енергосистемі при таких параметрах: $E_a = 1,05$, $x_{\text{вн}} = 0,1$. Графіки зміни характеристик двигуна наведено на рис. 7.

Самозапуск відбувається успішно, час самозапуску становить $t_{c.3} = 12,5$ с.

Розрахунок 4. Режим самозапуску двигуна при великій несиметрії напруги в енергосистемі: $E_a = 1,05$, $E_b = 0,9$, $E_c = 0$, $x_{\text{вн}} = 0,1$. Графіки зміни характеристик двигуна зображено на рис. 8.

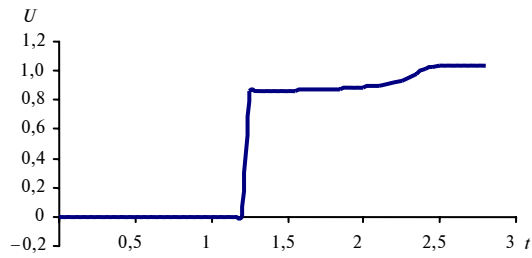
За цих умов самозапуск неуспішний.

Результати дослідно-промислових розрахунків самозапуску:

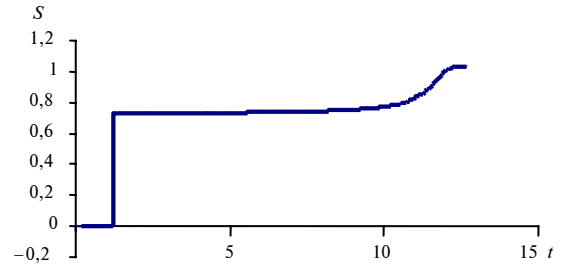
- при $x_{\text{вн}} = 0,05$ несиметрія напруги в енергосистемі призвела до збільшення тривалості самозапуску з 2,5 до 3,8 с;
- при $x_{\text{вн}} = 0,1$ і глибокій несиметрії напруги в енергосистемі самозапуск не відбувається.

Розрахунок 5. Проведемо аналіз впливу несиметрії напруги в енергосистемі на час самозапуску двигуна. Введемо коефіцієнт несиметрії напруги в енергосистемі як відношення напруги оберненої послідовності до напруги прямої послідовності: $K = \frac{E_2}{E_1}$.

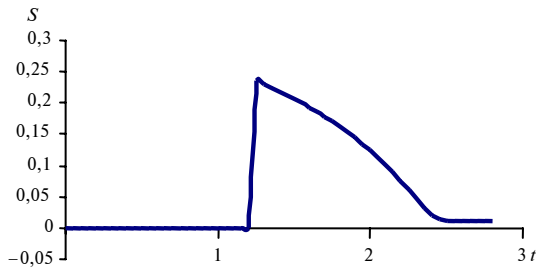
При різному коефіцієнті несиметрії напруги в енергосистемі проведено серію розрахунків самозапуску двигуна. На рис. 9 показано залежність часу самозапуску двигуна від коефіцієнта несиметрії напруги в енергосистемі, з якої випливає, що при збільшенні коефіцієнта до 0,3 самозапуск досить мало залежить від K , а при $K > 0,3$ час самозапуску різко збільшується.



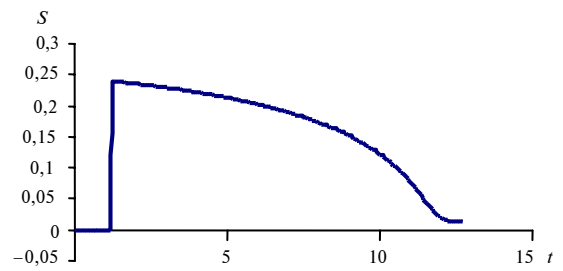
a



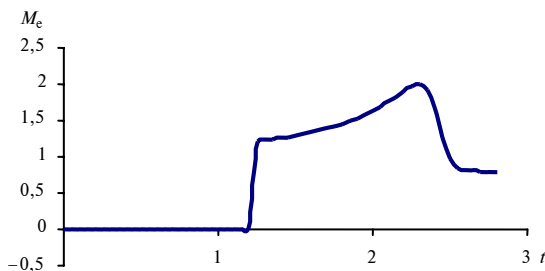
a



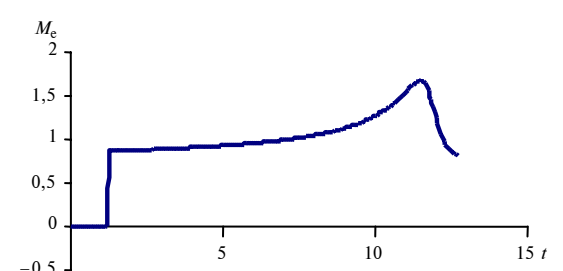
б



б



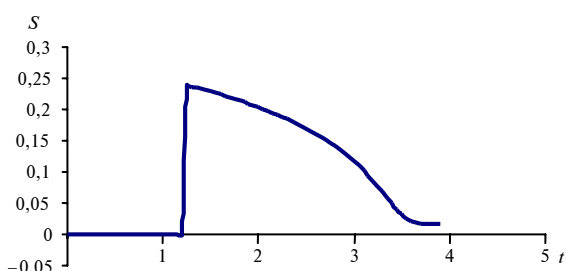
в



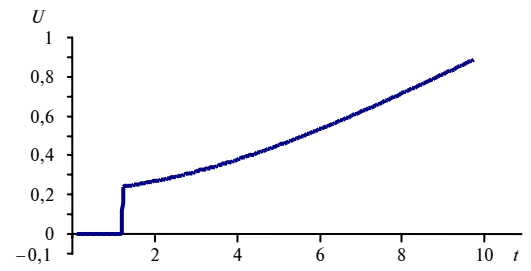
в

Рис. 5. Графік залежності напруги (*a*), ковзання (*б*) і електромагнітного моменту (*в*) від часу для розрахунку режиму самозапуску при симетричному режимі, $E_a = 1,05$, $x_{BH} = 0,05$

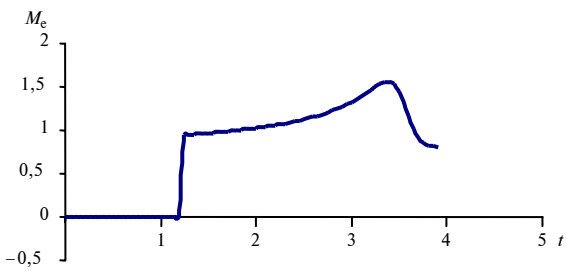
Рис. 7. Графік залежності напруги (*a*), ковзання (*б*) і електромагнітного моменту (*в*) від часу для розрахунку режиму самозапуску при симетричному режимі, $E_a = 1,05$, $x_{BH} = 0,1$



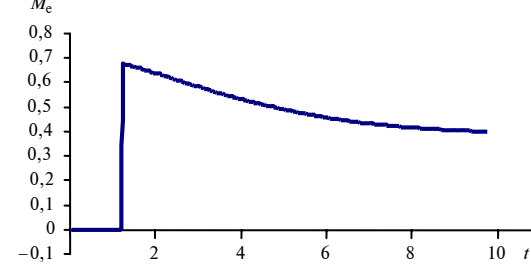
a



a



б



б

Рис. 6. Графік залежності ковзання (*a*) і електромагнітного моменту (*б*) від часу для розрахунку режиму самозапуску при несиметричному режимі, $x_{BH} = 0,05$

Рис. 8. Графік залежності ковзання (*a*) і електромагнітного моменту (*б*) від часу для розрахунку режиму самозапуску при несиметричному режимі, $x_{BH} = 0,1$

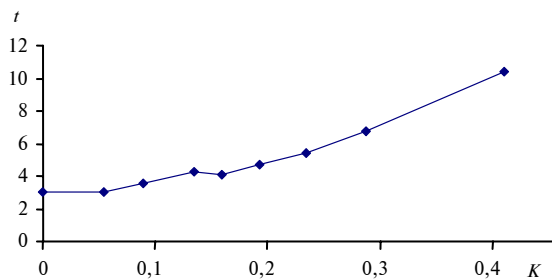


Рис. 9. Графік залежності часу самозапуску двигуна від коефіцієнта несиметрії напруги в енергосистемі

Висновки

Аналіз результатів розрахунку засвідчив про істотний вплив ступеня несиметрії напруги в енергосистемі на самозапуск двигуна.

Результати дослідно-промислових розрахунків самозапуску показали: при $x_{\text{вн}} = 0,05$ несиметрія напруги в енергосистемі призвела до збільшення тривалості самозапуску з 2,5 до 3,8 с; при $x_{\text{вн}} = 0,1$ і глибокій несиметрії напруги в енергосистемі самозапуск не відбува-

ється. При збільшенні коефіцієнта несиметрії напруги в енергосистемі до 0,3 самозапуск досить мало залежить від K , а при $K > 0,3$ час самозапуску різко збільшується.

Результати дослідження можуть бути використані оперативним персоналом електростанцій і крупних промислових підприємств при вирішенні питання щодо застосування самозапуску двигуна в умовах несиметрії напруги в енергосистемі.

Дослідження має зв'язок з науковим напрямком дослідження кафедри "Електричні станції" "Оцінка технічного стану електрообладнання енергосистем" та держбюджетною роботою "Розробка нечітких моделей електрообладнання АЕС для експертної системи прийняття рішень по управлінню ресурсом електрообладнання".

Проблема підвищення експлуатаційної надійності асинхронних двигунів є дуже великою. У статті розглянуто лише один з її аспектів, тому вона потребує більш глибокого дослідження.

И. Зиа, Т.Ю. Курач

АНАЛИЗ САМОЗАПУСКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Разработаны математическая модель и алгоритм определения условий самозапуска при несимметрии напряжения в энергосистеме. Выполнены опытно-промышленные расчеты самозапуска двигателя, составлены программы в среде MatLab для расчета самозапуска асинхронного двигателя.

I. Zia, T.Yu. Kurach

THE ANALYSIS OF ASYNCHRONOUS ENGINE SELF-START AT ASYMMETRY IN THE SYSTEM

In this paper, we elaborate the mathematical model and algorithm for determination of the self-start conditions at voltage asymmetry in the power system. Moreover, we make the trial calculations of the engine self-start and develop the programmes in the MatLab environment for the calculation of the asynchronous engine self-start.

1. Сивокобыленко В.Д., Лебедев В.К. Переходные процессы в системах электроснабжения собственных нужд электростанций. – Донецк: РВА Дон НТУ, 2002. – 136 с.
2. Костерев Н.В. Моделирование и динамика атомных электростанций при возмущениях в энергосистеме. – К.: Вища шк., 1986. – 168 с.
3. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
4. Важнов А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, Ленинград. отд., 1969. – 768 с.

Рекомендована Радою факультету електроенерготехніки та автоматики НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
15 червня 2008 року

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА КЕРУВАННЯ

УДК 519.85

О.О. Ємець, Ол-ра О. Ємець

ОПЕРАЦІЇ І ВІДНОШЕННЯ НАД НЕЧІТКИМИ ЧИСЛАМИ

Вступ

З подальшим розвитком комбінаторної оптимізації [1–15] виникає проблема більш адекватного врахування даних, які описують ті чи інші явища, об'єкти, моделі. Дану проблему можна розв'язати, враховуючи різні види невизначеності. Зокрема, це можна зробити з використанням апарату нечітких множин [16].

У [16, 17] і багатьох інших працях розглядалися операції над нечіткими числами як операції над нечіткими множинами. Але для моделювання задач комбінаторної оптимізації це ще не дає можливості будувати моделі, тому в [18, 19] розпочато дослідження цих питань.

Уявляється, зокрема, за необхідне ввести операцію додавання нечітких чисел, характеристичну функцію нечіткого числа, відношення впорядкованості масиву нечітких чисел та дослідити їх властивості.

Постановка задачі

Мета статті — за допомогою нечітких чисел розробити апарат, який дав би можливість формалізувати невизначеність даних у задачах евклідової комбінаторної оптимізації і, зокрема, при моделюванні задач знаходити суму нечітких чисел, максимальне і мінімальне нечітке число, а також порівнювати нечіткі числа між собою.

Операції і відношення над нечіткими числами та їх властивості

Введемо поняття нечіткого числа.

Означення 1. Нечітким числом a називають нечітку множину $a = \{(a_1 | \mu_1), \dots, (a_k | \mu_k)\}$, де $\{a_1, a_2, \dots, a_k\}$ ($a_i \in R^1 \ \forall i \in J_k$) — носій нечіткої множини, $\{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k\}$ ($\mu_i \in R^1 \ \forall i \in J_k$) — множина значень функції приналежності, $0 \leq \mu_i \leq 1 \ \forall i \in J_k$ [16, 18]. Тут і надалі J_k позначаємо множину перших k натуральних чисел.

Зауважимо, що дійсне число α можна зобразити як нечітке число $a = \{(\alpha | 1, 0)\}$.

Введемо поряд із поняттями суми та лінійної впорядкованості нечітких чисел поняття характеристичної функції (функціоналу) $H(x)$ нечіткого числа x як $H(x) : X \rightarrow R^1$, яка діє з множини нечітких чисел X в R^1 (в множину дійсних чисел) та узагальнює такі метричні властивості дійсного числа:

1) при $x \in R^1$ повинна виконуватись рівність $H(x) = x$;

2) для введеної певним чином лінійної впорядкованості \prec на множині нечітких чисел X має виконуватись правило: якщо $x \prec y$, то $H(x) \leq H(y)$ та якщо $H(x) \leq H(y)$, то $x \prec y$;

3) для введеної певним чином суми $x + y$ нечітких чисел $x, y \in X$ повинна виконуватись рівність $H(x + y) = H(x) + H(y)$;

4) для суми нечітких чисел має виконуватись правило: якщо $x \prec y$, то $x + z \prec y + z$.

Таким чином, необхідно ввести поняття суми, лінійної впорядкованості і характеристичної функції, які б відповідали переліченим властивостям.

Введемо поняття суми нечітких чисел.

Суму $A + B$ двох нечітких чисел $A = \{(a_1 | \mu_1^A), \dots, (a_\alpha | \mu_\alpha^A)\}$ і $B = \{(b_1 | \mu_1^B), \dots, (b_\beta | \mu_\beta^B)\}$ утворимо за допомогою побудови множини пар

$$\begin{aligned} \tilde{C} &= \{(\tilde{c}_1 | \mu_{\tilde{c}_1}^{\tilde{C}}), \dots, (\tilde{c}_\eta | \mu_{\tilde{c}_\eta}^{\tilde{C}})\} = \\ &= \left\{ \left(a_1 + b_1 \left| \frac{\mu_1^A}{\sum_{i=1}^{\alpha} \mu_i^A} \frac{\mu_1^B}{\sum_{j=1}^{\beta} \mu_j^B} \right. \right), \dots, \left(a_1 + b_\beta \left| \frac{\mu_1^A}{\sum_{i=1}^{\alpha} \mu_i^A} \frac{\mu_\beta^B}{\sum_{j=1}^{\beta} \mu_j^B} \right. \right), \right. \\ &\left. \left(a_2 + b_1 \left| \frac{\mu_2^A}{\sum_{i=1}^{\alpha} \mu_i^A} \frac{\mu_1^B}{\sum_{j=1}^{\beta} \mu_j^B} \right. \right), \dots, \left(a_2 + b_\beta \left| \frac{\mu_2^A}{\sum_{i=1}^{\alpha} \mu_i^A} \frac{\mu_\beta^B}{\sum_{j=1}^{\beta} \mu_j^B} \right. \right), \dots \right. \\ &\left. \dots, \left(a_\alpha + b_1 \left| \frac{\mu_\alpha^A}{\sum_{i=1}^{\alpha} \mu_i^A} \frac{\mu_1^B}{\sum_{j=1}^{\beta} \mu_j^B} \right. \right), \dots, \left(a_\alpha + b_\beta \left| \frac{\mu_\alpha^A}{\sum_{i=1}^{\alpha} \mu_i^A} \frac{\mu_\beta^B}{\sum_{j=1}^{\beta} \mu_j^B} \right. \right) \right\}. \quad (1) \end{aligned}$$

Перші елементи $\tilde{c}_1, \dots, \tilde{c}_\eta$, де $\eta = \alpha\beta$, цих пар утворюють мультимножину $\tilde{C}^* = \{\tilde{c}_1, \dots, \tilde{c}_\eta\}$.

Основа $S(\tilde{C}^*)$ мультимножини \tilde{C}^* : $S(\tilde{C}^*) = \{c_1, \dots, c_r\}$ це носій нечіткого числа $A + B = \{(c_1 | \mu_1), \dots, (c_r | \mu_r)\}$. Значення функції приналежності знаходиться за правилом

$$\mu_t = \sum_{\forall i \in J_\alpha: c_i = \tilde{c}_t} \mu_i^{\tilde{C}}, \quad i \in J_\eta, \quad t \in J_r, \quad (2)$$

тобто значення μ_t визначається як сума таких чисел $\mu_i^{\tilde{C}}$, для яких $\tilde{c}_i = c_t$, а r – число різних елементів в \tilde{C}^* .

Отже, можна дати таке означення.

Означення 2. Сумою $A + B$ двох нечітких чисел A і B називається нечітке число $C = \{(c_1 | \mu_1), \dots, (c_r | \mu_r)\}$, де $\{c_1, \dots, c_r\} = S(\tilde{C}^*)$ – основа мультимножини $\{\tilde{c}_1, \dots, \tilde{c}_\eta\}$. Число C визначається за правилом (1), а значення μ_t – за правилом (2).

Наведемо приклад знаходження суми двох нечітких чисел.

Приклад 1. Знайти суму двох нечітких чисел $A = \{(1|0,4), (2|0,6)\}$ і $B = \{(3|0,9), (4|0,6)\}$.

Спочатку знайдемо суми $\sum_{i=1}^\alpha \mu_i^A$ і $\sum_{j=1}^\beta \mu_j^B$, що використовуються у формулі (1). Поклавши $\alpha = \beta = 2$, отримаємо

$$\sum_{i=1}^2 \mu_i^A = 0,4 + 0,6 = 1, \quad \sum_{j=1}^2 \mu_j^B = 0,9 + 0,6 = 1,5.$$

Збудуємо множину пар \tilde{C} за правилом (1):

$$\tilde{C} = \left(a_1 + b_1 \left| \frac{\mu_1^A \quad \mu_1^B}{\sum_{i=1}^2 \mu_i^A \quad \sum_{j=1}^2 \mu_j^B} \right. \right), \left(a_1 + b_2 \left| \frac{\mu_1^A \quad \mu_2^B}{\sum_{i=1}^2 \mu_i^A \quad \sum_{j=1}^2 \mu_j^B} \right. \right),$$

$$\left(a_2 + b_1 \left| \frac{\mu_2^A \quad \mu_1^B}{\sum_{i=1}^2 \mu_i^A \quad \sum_{j=1}^2 \mu_j^B} \right. \right), \left(a_2 + b_2 \left| \frac{\mu_2^A \quad \mu_2^B}{\sum_{i=1}^2 \mu_i^A \quad \sum_{j=1}^2 \mu_j^B} \right. \right) =$$

$$= \left\{ \left(1 + 3 \left| \frac{0,4 \quad 0,9}{1 \quad 1,5} \right. \right), \left(1 + 4 \left| \frac{0,4 \quad 0,6}{1 \quad 1,5} \right. \right), \right.$$

$$\left. \left(2 + 3 \left| \frac{0,6 \quad 0,9}{1 \quad 1,5} \right. \right), \left(2 + 4 \left| \frac{0,6 \quad 0,6}{1 \quad 1,5} \right. \right) \right\} =$$

$$= \{(4|0,24), (5|0,16), (5|0,36), (6|0,24)\}.$$

Перші елементи множини пар \tilde{C} утворюють мультимножину $\{4, 5, 5, 6\}$. Основа мульти-

множини – $S(\tilde{C}^*) = \{4, 5, 6\}$. Згідно з правилом (2), для елемента 5 функція приналежності дорівнює сумі $0,16 + 0,36$. Таким чином, сума заданих чисел становить $A + B = \{(4|0,24), (5|0,52), (6|0,24)\}$.

Означення 3. Сумою трьох нечітких чисел $A = \{(a_1 | \mu_1^A), \dots, (a_\alpha | \mu_\alpha^A)\}$, $B = \{(b_1 | \mu_1^B), \dots, (b_\beta | \mu_\beta^B)\}$ і $D = \{(d_1 | \mu_1^D), \dots, (d_\delta | \mu_\delta^D)\}$ називається нечітке число $A + B + D = E + D$, де $E = A + B$.

Твердження 1. Операція додавання нечітких чисел комутативна, тобто $A + B = B + A$.

Доведення. При утворенні множини пар \tilde{C} використовуються такі операції: додавання

$$a_i + b_j \quad \text{і} \quad \text{знаходження добутку} \quad \frac{\mu_i^A \quad \mu_j^B}{\sum_{k=1}^\alpha \mu_k^A \quad \sum_{t=1}^\beta \mu_t^B},$$

$i \in J_\alpha, j \in J_\beta$. Оскільки ці операції комутативні, тобто

$$a_i + b_j = b_j + a_i,$$

$$\frac{\mu_i^A \quad \mu_j^B}{\sum_{k=1}^\alpha \mu_k^A \quad \sum_{t=1}^\beta \mu_t^B} = \frac{\mu_j^B \quad \mu_i^A}{\sum_{t=1}^\beta \mu_t^B \quad \sum_{k=1}^\alpha \mu_k^A},$$

то множина пар \tilde{C}^{A+B} , отримана при додаванні чисел A і B , буде ідентична множині пар \tilde{C}^{B+A} , отриманій при додаванні чисел B і A .

Твердження 2. Операція додавання нечітких чисел асоціативна, тобто $(A + B) + D = A + (B + D)$.

Доведення. При утворенні множини пар \tilde{C} використовуються такі операції: додавання $(a_i + b_j) + d_k$ і знаходження добутку

$\left(\frac{\mu_i^A \mu_j^B}{\sum_{s=1}^{\alpha} \mu_s^A \sum_{t=1}^{\beta} \mu_t^B} \right) \frac{\mu_k^D}{\sum_{r=1}^{\delta} \mu_r^D}$. Оскільки ці операції асоціативні, тобто

$$(a_i + b_j) + d_k = a_i + (b_j + d_k),$$

$$\left(\frac{\mu_i^A \mu_j^B}{\sum_{s=1}^{\alpha} \mu_s^A \sum_{t=1}^{\beta} \mu_t^B} \right) \frac{\mu_k^D}{\sum_{r=1}^{\delta} \mu_r^D} = \frac{\mu_i^A}{\sum_{s=1}^{\alpha} \mu_s^A} \left(\frac{\mu_j^B \mu_k^D}{\sum_{t=1}^{\beta} \mu_t^B \sum_{r=1}^{\delta} \mu_r^D} \right),$$

$$i \in J_{\alpha}, j \in J_{\beta}, k \in J_{\delta},$$

то множина пар $\tilde{C}^{(A+B)+D}$ буде ідентична множині пар $\tilde{C}^{A+(B+D)}$.

Аналогічно визначається сума будь-якої кількості нечітких чисел a_1, \dots, a_n :

$$a_1 + \dots + a_n = (a_1 + \dots + a_{n-1}) + a_n, n \geq 3.$$

З останніх тверджень випливає, що суму n нечітких чисел $a_i = \{(g_i^i | \mu_i^i), \dots, (g_{q_i}^i | \mu_{q_i}^i)\}$, $i \in J_n$, можна визначати ітеративно, тобто спочатку знайти суму двох нечітких чисел, потім до неї додати третє нечітке число і т.д. Оскільки операція додавання нечітких чисел є комутативною (див. твердження 1) і асоціативною (див. твердження 2), то порядок додавання n чисел значення не має.

Дамо один із можливих варіантів означення характеристичної функції (функціоналу) $H(x)$ нечіткого числа x $H(x) : X \rightarrow R^1$.

Означення 4. Характеристичною функцією (функціоналом) $H(x) : X \rightarrow R^1$ нечіткого числа $A = \{(a_1 | \mu_1^A), \dots, (a_{\alpha} | \mu_{\alpha}^A)\}$, називається функція, яка нечіткому числу $A \in X$ ставить у відповідність число $H(A) \in R^1$ за правилом

$$H(A) = \frac{\sum_{i=1}^{\alpha} a_i \mu_i^A}{\sum_{i=1}^{\alpha} \mu_i^A}. \quad (3)$$

Нехай задано два нечіткі числа: $A = \{(a_1 | \mu_1^A), \dots, (a_{\alpha} | \mu_{\alpha}^A)\}$ і $B = \{(b_1 | \mu_1^B), \dots, (b_{\beta} | \mu_{\beta}^B)\}$.

Введемо позначимо: $a = \{a_1, \dots, a_{\alpha}\}$, $b = \{b_1, \dots, b_{\beta}\}$, $u = a \cup b = \{u_1, \dots, u_{\gamma}\}$. Тоді число A можна записати у вигляді

$$A^u = \{(u_1 | \mu_1^{A^u}), \dots, (u_{\gamma} | \mu_{\gamma}^{A^u})\},$$

де

$$\mu_i^{A^u} = \begin{cases} \mu_j^A, & \text{якщо } u_i = a_j \in a, \\ 0, & \text{якщо } u_i \notin a, \end{cases}$$

а число B – у вигляді

$$B^u = \{(u_1 | \mu_1^{B^u}), \dots, (u_{\gamma} | \mu_{\gamma}^{B^u})\},$$

де

$$\mu_i^{B^u} = \begin{cases} \mu_j^B, & \text{якщо } u_i = b_j \in b, \\ 0, & \text{якщо } u_i \notin b. \end{cases}$$

Дамо означення впорядкованості нечітких чисел.

Означення 5. Два нечіткі числа A і B називаються *впорядкованими за зростанням* ($A < B$), якщо:

$$\text{а) або } \frac{\sum_{i=1}^{\alpha} a_i \mu_i^A}{\sum_{i=1}^{\alpha} \mu_i^A} < \frac{\sum_{j=1}^{\beta} b_j \mu_j^B}{\sum_{j=1}^{\beta} \mu_j^B}, \text{ тобто тоді, коли}$$

$$H(A) < H(B);$$

$$\text{б) або } H(A) = H(B), \text{ тобто } \frac{\sum_{i=1}^{\alpha} a_i \mu_i^A}{\sum_{i=1}^{\alpha} \mu_i^A} =$$

$$\frac{\sum_{j=1}^{\beta} b_j \mu_j^B}{\sum_{j=1}^{\beta} \mu_j^B}, \text{ але } \mu_1^{A^u} = \mu_1^{B^u}, \dots, \mu_k^{A^u} = \mu_k^{B^u}, \mu_{k+1}^{A^u} < \mu_{k+1}^{B^u} \text{ (} k < \gamma \text{); тоді будемо говорити, що } A \text{ передує } B \text{ за зростанням.}$$

Приклад 2. Визначити впорядкованість чисел $A = \{(1|0,4), (2|0,6)\}$ і $B = \{(3|0,9), (4|0,6)\}$.

$$\text{Спочатку знайдемо суми } \sum_{i=1}^{\alpha} \mu_i^A, \sum_{j=1}^{\beta} \mu_j^B.$$

Покладемо $\alpha = \beta = 2$. Тоді матимемо

$$\sum_{i=1}^2 \mu_i^A = 0,4 + 0,6 = 1, \quad \sum_{j=1}^2 \mu_j^B = 0,9 + 0,6 = 1,5.$$

Знайдемо $H(A)$ і $H(B)$:

$$H(A) = \frac{\sum_{i=1}^2 a_i \mu_i^A}{\sum_{i=1}^2 \mu_i^A} = \frac{1 \cdot 0,4 + 2 \cdot 0,6}{1} = 1,6,$$

$$H(B) = \frac{\sum_{j=1}^2 b_j \mu_j^B}{\sum_{j=1}^2 \mu_j^B} = \frac{3 \cdot 0,9 + 4 \cdot 0,6}{1,5} = \frac{5,1}{1,5} = 3,1875.$$

Отже, згідно з означенням (5а), $A < B$, $H(A) < H(B)$.

Тут і далі (5а), (5б), (6а), (6б) означає: згідно з означенням 5 (або 6) пункту а (або б), відповідно.

Означення 6. Два нечіткі числа A і B називаються впорядкованими за неспаданням (позначається $A < B$), якщо:

а) або $A < B$;

б) або $A = B$, тобто тоді, коли $a_i = b_i$ і

$$\mu_i^A = \mu_i^B \quad \forall i.$$

Покажемо, що впорядкованість $<$ є лінійною.

Твердження 3. Впорядкованість $<$, введена означеннями 5 і 6, є рефлексивною, антисиметричною і транзитивною, тобто лінійною.

Доведення. Розглянемо конкретно ці властивості впорядкованості:

1) впорядкованість $<$ є рефлексивною: $A < A$ (згідно з означенням б);

2) антисиметричність – це, якщо $A < B$, $B < A$, то $A = B$. Одночасно $A < B$ і $B < A$ для введеної впорядкованості $<$ можливі лише у випадку означення б (б), тобто коли $A = B$, отже впорядкованість є антисиметричною;

3) транзитивність – це, якщо $A < B$, $B < C$, то $A < C$. Можливі наступні випадки для пари A , B : $A < B$ (5а); $A < B$ (5б); $A = B$ (6б); для пари B , C : $B < C$ (5а); $B < C$ (5б); $B = C$ (6б).

Таким чином, можливі дев'ять пар ситуацій:

1) $A < B$ (5а), $B < C$ (5а), $H(A) < H(B)$, $H(B) < H(C)$. З цього випливає, що $H(A) < H(B)$, $A < C$ за означенням (5а), отже, $A < C$;

2) $A < B$ (5а), $B < C$ (5б), $H(A) < H(B)$, $H(B) = H(C)$. Звідси випливає, що $H(A) < H(C)$ за означенням (5а), значить, $A < C$;

3) $A < B$ (5а), $B = C$ (6б), $H(A) < H(B)$, $H(B) = H(C)$, звідки $H(A) < H(C)$ за означенням (5а), отже, $A < C$;

4) $A < B$ (5б), $B < C$ (5а), $H(A) = H(B)$, $H(B) < H(C)$. З цього випливає, що $H(A) < H(C)$ за означенням (5а), отже, $A < C$;

5) $A < B$ (5б), $B < C$ (5б), $H(A) = H(B)$, $H(B) = H(C)$. Звідси маємо $H(A) = H(C)$ за означенням (5б) або (6б), тобто $A < C$;

6) $A < B$ (5б), $B = C$ (6б), $H(A) = H(B)$, $H(B) = H(C)$. З цього випливає, що $H(A) = H(C)$ за означенням (5б) або (6б), тобто $A < C$;

7) $A = B$ (6б), $B < C$ (5а), $H(A) = H(B)$, $H(B) < H(C)$. Звідси маємо $H(A) < H(C)$ за означенням (5а), тобто $A < C$;

8) $A = B$ (6б), $B < C$ (5б), $H(A) = H(B)$, $H(B) = H(C)$, звідки маємо $H(A) = H(C)$ за означенням (5б) або (6б), тобто $A < C$;

9) $A = B$ (6б), $B = C$ (6б), тобто $A = C$ (відношення рівності двох нечітких чисел, очевидно, є транзитивним). Значить, $A < C$.

Отже, доведено, що у всіх дев'яти випадках транзитивність справджується.

Тому доведено, що впорядкованість $<$ є лінійною.

Покажемо, що для введеної в такий спосіб характеристичної функції, операції додавання і лінійної впорядкованості мають місце зазначені вище властивості.

Твердження 4. Якщо $x \in R^1$, то $H(x) = x$.

Доведення. Якщо x є дійсним числом, то x має вигляд $x = \{(x|1)\}$, а характеристична функція $H(x)$ набуває вигляду $H(x) = \frac{x \cdot 1}{1} = x$, що і слід було довести.

Твердження (теорема) 5. Для будь-яких двох нечітких чисел $A = \{(a_1|\mu_1^A), \dots, (a_\alpha|\mu_\alpha^A)\}$, $B = \{(b_1|\mu_1^B), \dots, (b_\beta|\mu_\beta^B)\}$ і характеристичної функції H , заданої за правилом (3), має місце рівність

$$H(A + B) = H(A) + H(B). \quad (4)$$

Доведення. Знайдемо суму чисел A і B :

$$A+B = \left\{ \left(a_1 + b_1 \left| \frac{\mu_1^A}{\sum_{i=1}^{\alpha} \mu_i^A} \frac{\mu_1^B}{\sum_{j=1}^{\beta} \mu_j^B} \right. \right), \dots, \left(a_1 + b_{\beta} \left| \frac{\mu_1^A}{\sum_{i=1}^{\alpha} \mu_i^A} \frac{\mu_{\beta}^B}{\sum_{j=1}^{\beta} \mu_j^B} \right. \right), \dots \right. \\ \left. \dots, \left(a_{\alpha} + b_1 \left| \frac{\mu_{\alpha}^A}{\sum_{i=1}^{\alpha} \mu_i^A} \frac{\mu_1^B}{\sum_{j=1}^{\beta} \mu_j^B} \right. \right), \dots, \left(a_{\alpha} + b_{\beta} \left| \frac{\mu_{\alpha}^A}{\sum_{i=1}^{\alpha} \mu_i^A} \frac{\mu_{\beta}^B}{\sum_{j=1}^{\beta} \mu_j^B} \right. \right) \right\}.$$

Знайдемо характеристичну функцію $H(A+B)$:

$$H(A+B) = \left((a_1 + b_1) \frac{\mu_1^A}{\sum_{i=1}^{\alpha} \mu_i^A} \frac{\mu_1^B}{\sum_{j=1}^{\beta} \mu_j^B} + \dots + (a_1 + b_{\beta}) \frac{\mu_1^A}{\sum_{i=1}^{\alpha} \mu_i^A} \frac{\mu_{\beta}^B}{\sum_{j=1}^{\beta} \mu_j^B} + \dots + (a_{\alpha} + b_1) \frac{\mu_{\alpha}^A}{\sum_{i=1}^{\alpha} \mu_i^A} \frac{\mu_1^B}{\sum_{j=1}^{\beta} \mu_j^B} + \dots + (a_{\alpha} + b_{\beta}) \frac{\mu_{\alpha}^A}{\sum_{i=1}^{\alpha} \mu_i^A} \frac{\mu_{\beta}^B}{\sum_{j=1}^{\beta} \mu_j^B} \right) \left(\frac{\mu_1^A}{\sum_{i=1}^{\alpha} \mu_i^A} \frac{\mu_1^B}{\sum_{j=1}^{\beta} \mu_j^B} + \dots + \frac{\mu_{\alpha}^A}{\sum_{i=1}^{\alpha} \mu_i^A} \frac{\mu_1^B}{\sum_{j=1}^{\beta} \mu_j^B} + \dots + \frac{\mu_{\alpha}^A}{\sum_{i=1}^{\alpha} \mu_i^A} \frac{\mu_{\beta}^B}{\sum_{j=1}^{\beta} \mu_j^B} \right)^{-1}. \quad (5)$$

Легко помітити, що знаменник виразу (5) дорівнює 1. Спростивши чисельник виразу (5), отримаємо $H(A) + H(B)$.

Отже, вираз (5) набуває вигляду $H(A+B) = H(A) + H(B)$, що і треба було довести.

Твердження (теорема) 6. Для будь-яких трьох нечітких чисел $x = \{(x_1 | \mu_1^x), \dots, (x_{\alpha} | \mu_{\alpha}^x)\}$, $y = \{(y_1 | \mu_1^y), \dots, (y_{\beta} | \mu_{\beta}^y)\}$, $\{(z_1 | \mu_1^z), \dots, (z_{\gamma} | \mu_{\gamma}^z)\}$, таких, що $\sum_{k=1}^{\alpha} \mu_k^x = \sum_{k=1}^{\beta} \mu_k^y = \sum_{k=1}^{\gamma} \mu_k^z = 1$, $x_1 < \dots < x_{\alpha}$, $y_1 < \dots < y_{\beta}$, $z_1 < \dots < z_{\gamma}$, виконується правило: якщо $x < y$, то $x + z < y + z$.

Доведення. Якщо $x < y$, то за означенням лінійної впорядкованості виконується нерівність

$$H(x) \leq H(y). \quad (6)$$

Отже, за твердженням 5 маємо

$$H(x+z) = H(x) + H(z), \\ H(y+z) = H(y) + H(z).$$

Оскільки виконується (6), то

$$H(x) + H(z) \leq H(y) + H(z), \\ H(x+z) \leq H(y+z).$$

За означенням, якщо $H(x+z) < H(y+z)$, то $x+z < y+z$.

Якщо $x+z = y+z$ (значить, $H(x+z) = H(y+z)$), то $x+z < y+z$.

У випадку $H(x+z) = H(y+z)$, $x+z \neq y+z$, тобто $x \neq y$, маємо

$$\exists i \mu_1^{x''} = \mu_1^{y''}, \dots, \mu_i^{x''} = \mu_i^{y''}, \mu_{i+1}^{x''} < \mu_{i+1}^{y''}.$$

Покажемо, що в цьому випадку

$$\exists j \mu_1^{x''+z''} = \mu_1^{y''+z''}, \dots, \mu_j^{x''+z''} = \mu_j^{y''+z''},$$

але $\mu_{j+1}^{x''+z''} < \mu_{j+1}^{y''+z''}$.

Нехай $U = \{u_1, \dots, u_{\delta}\} = \{x_1, \dots, x_{\alpha}\} \cup \{y_1, \dots, y_{\beta}\} \cup \{z_1, \dots, z_{\gamma}\}$, $u_1 < \dots < u_{\delta}$. Тоді числа x , y , z можна записати у вигляді

$$x'' = \{(u_1 | \mu_1^{x''}), \dots, (u_{\delta} | \mu_{\delta}^{x''})\},$$

$$y^u = \{(u_1 | \mu_1^{y^u}), \dots, (u_\delta | \mu_\delta^{y^u})\},$$

$$z^u = \{(u_1 | \mu_1^{z^u}), \dots, (u_\delta | \mu_\delta^{z^u})\},$$

$$\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{x^u} = \sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{y^u} = \sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{z^u} = 1.$$

Знайдемо суму $x^u + z^u$. Згідно з означенням 2, маємо

$$x^u + z^u = \left\{ \left(u_1 + u_1 \left| \frac{\mu_1^{x^u}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{x^u}} \frac{\mu_1^{z^u}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{z^u}} \right. \right), \dots, \right.$$

$$\dots, \left(u_1 + u_\delta \left| \frac{\mu_1^{x^u}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{x^u}} \frac{\mu_\delta^{z^u}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{z^u}} \right. \right), \dots,$$

$$\dots, \left(u_\delta + u_1 \left| \frac{\mu_\delta^{x^u}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{x^u}} \frac{\mu_1^{z^u}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{z^u}} \right. \right), \dots,$$

$$\dots, \left. \left(u_\delta + u_\delta \left| \frac{\mu_\delta^{x^u}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{x^u}} \frac{\mu_\delta^{z^u}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{z^u}} \right. \right) \right\}.$$

Знайдемо суму $y^u + z^u$:

$$y^u + z^u = \left\{ \left(u_1 + u_1 \left| \frac{\mu_1^{y^u}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{y^u}} \frac{\mu_1^{z^u}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{z^u}} \right. \right), \dots, \right.$$

$$\dots, \left(u_1 + u_\delta \left| \frac{\mu_1^{y^u}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{y^u}} \frac{\mu_\delta^{z^u}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{z^u}} \right. \right), \dots,$$

$$\dots, \left(u_\delta + u_1 \left| \frac{\mu_\delta^{y^u}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{y^u}} \frac{\mu_1^{z^u}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{z^u}} \right. \right), \dots,$$

$$\dots, \left(u_\delta + u_\delta \left| \frac{\mu_\delta^{y^u}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{y^u}} \frac{\mu_\delta^{z^u}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{z^u}} \right. \right) \left. \right\}.$$

Порівнюючи $x^u + z^u$ і $y^u + z^u$, бачимо, що перші елементи пар для обох сум однакові і утворюють матрицю U такого вигляду:

$$U = \begin{pmatrix} u_1 + u_1 & u_1 + u_2 & \dots & u_1 + u_i & u_1 + u_{i+1} & \dots & u_1 + u_\delta \\ u_2 + u_1 & u_2 + u_2 & \dots & u_2 + u_i & u_2 + u_{i+1} & \dots & u_2 + u_\delta \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_i + u_1 & u_i + u_2 & \dots & u_i + u_i & u_i + u_{i+1} & \dots & u_i + u_\delta \\ u_{i+1} + u_1 & u_{i+1} + u_2 & \dots & u_{i+1} + u_i & u_{i+1} + u_{i+1} & \dots & u_{i+1} + u_\delta \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_\delta + u_1 & u_\delta + u_2 & \dots & u_\delta + u_i & u_\delta + u_{i+1} & \dots & u_\delta + u_\delta \end{pmatrix}.$$

Проаналізуємо матрицю U :

1) матриця є симетричною відносно головної діагоналі, тобто

$$u_s + u_r = u_r + u_s, \quad s \neq r, \quad s, r \in J_\delta;$$

2) елементи в кожному рядку і стовпчику впорядковані за зростанням.

Виділимо з матриці U підматрицю U' :

$$U' = \begin{pmatrix} u_1 + u_1 & u_1 + u_2 & \dots & u_1 + u_i \\ u_2 + u_1 & u_2 + u_2 & \dots & u_2 + u_i \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_i + u_1 & u_i + u_2 & \dots & u_i + u_i \end{pmatrix}.$$

Порівняємо функції приналежності сум $x^u + z^u$ і $y^u + z^u$ для елементів під матриці U' .

Елементу $u_s + u_r$, де $s \leq i, r \leq i$, відповідає функція приналежності $\frac{\mu_s^{x^u}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{x^u}} \frac{\mu_r^{z^u}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{z^u}}$ суми

$x^u + z^u$ та $\frac{\mu_s^{y^u}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{y^u}} \frac{\mu_r^{z^u}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{z^u}}$ суми $y^u + z^u$.

Порівнюючи $\frac{\mu_s^{x''}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{x''}} \frac{\mu_r^{z''}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{z''}}$ та $\frac{\mu_s^{y''}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{y''}} \frac{\mu_r^{z''}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{z''}}$,

бачимо, що:

1) $\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{x''} = \sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{y''} = \sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{z''} = 1$;

2) $\mu_r^{z''}$ входить в обидві порівнювані величини, тому це не впливає на результат;

3) $\mu_s^{x''} = \mu_s^{y''}$, оскільки $s \leq i$, а нам дано,

що $\mu_1^{x''} = \mu_1^{y''}, \dots, \mu_i^{x''} = \mu_i^{y''}$.

Таким чином, маємо

$$\frac{\mu_s^{x''}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{x''}} \frac{\mu_r^{z''}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{z''}} = \frac{\mu_s^{y''}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{y''}} \frac{\mu_r^{z''}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{z''}} \quad \forall s, r \in J_i.$$

У матриці U , в тій її частині, в яку не входить підматриця U' , найменшим елементом є $u_{i+1} + u_1$, оскільки $u_1 < u_2 < \dots < u_{\delta}$.

Порівняємо функції приналежності для елемента $u_{i+1} + u_1$ сум $x'' + z''$ і $y'' + z''$, а саме

величини $\frac{\mu_{i+1}^{x''}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{x''}} \frac{\mu_1^{z''}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{z''}}$ і $\frac{\mu_{i+1}^{y''}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{y''}} \frac{\mu_1^{z''}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{z''}}$:

1) $\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{x''} = \sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{y''} = \sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{z''} = 1$;

2) $\mu_r^{z''}$ входить в обидві порівнювані величини, тому це не впливає на результат;

3) $\mu_{i+1}^{x''} < \mu_{i+1}^{y''}$ – дано за умовою.

Таким чином, робимо висновок, що

$$\frac{\mu_{i+1}^{x''}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{x''}} \frac{\mu_1^{z''}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{z''}} < \frac{\mu_{i+1}^{y''}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{y''}} \frac{\mu_1^{z''}}{\sum_{k=1}^{\delta} \mu_k^{z''}},$$

тобто ми отримаємо, що

$$\exists j \mu_1^{x''+z''} = \mu_1^{y''+z''}, \dots, \mu_j^{x''+z''} = \mu_j^{y''+z''},$$

але $\mu_{j+1}^{x''+z''} < \mu_{j+1}^{y''+z''}$. Отже, твердження доведено.

Твердження 7. Маємо $x < y$ тоді і тільки тоді, коли $H(x) \leq H(y)$.

Доведення. Якщо $H(x) \leq H(y)$, то за означенням впорядкованості $<$ маємо $x < y$. Якщо $x < y$, то:

1) або при $x \neq y$ і $H(x) \neq H(y)$ матимемо $H(x) < H(y)$;

2) або при $x \neq y \exists i \mu_1^{x''} = \mu_1^{y''}, \dots, \mu_i^{x''} = \mu_i^{y''}, \mu_{i+1}^{x''} < \mu_{i+1}^{y''}$ і $H(x) = H(y)$;

3) або при $x = y$ $H(x) = H(y)$.

Отже, в усіх можливих випадках з $x < y$ випливає, що $H(x) \leq H(y)$.

Введемо поняття максимального і мінімального нечіткого числа.

Означення 7. Нечітке число A_1 називається мінімальним серед нечітких чисел A_1, A_2, \dots, A_k , якщо $A_1 < A_2 < \dots < A_k$.

Означення 8. Нечітке число A_k називається максимальним серед нечітких чисел A_1, A_2, \dots, A_k , якщо $A_1 < A_2 < \dots < A_k$.

Висновки

Розвинуті елементи теорії нечітких множин і операції додавання нечітких чисел та відношення впорядкованості масиву нечітких чисел можуть бути використані при опису систем, об'єктів, явищ та процесів із врахуванням невизначеності. Зокрема, введені поняття, операції і відношення дають можливість будувати математичні моделі задач евклідової комбінаторної оптимізації з нечіткими даними.

Подальші дослідження доцільно спрямовувати на дослідження властивостей введених операцій і відношень, а також на їх використання при опису невизначеностей у складних системах (явищах, об'єктах, процесах).

О.А. Емец, А.О. Емец

ОПЕРАЦИИ И ОТНОШЕНИЯ НАД НЕЧЕТКИМИ ЧИСЛАМИ

Введено понятие характеристической функции нечеткого числа, операции сложения нечетких чи-

Oleg O. Yemets', Oleksandra O. Yemets'

OPERATIONS AND RELATIONS ON FUZZY NUMBERS

In this paper, we introduce the concept of the characteristic function of a fuzzy number. Through the

сел, а также отношения упорядоченности нечетких чисел. Исследованы свойства предложенных операций и отношений. Эти понятия, операции и отношения могут быть использованы при моделировании задач оптимизации с нечеткими данными.

samples provided, we demonstrate the operation of addition and the order relation of fuzzy numbers. Moreover, we study the properties of proposed operations and relations. We determine that these concepts can be used in simulation of optimization problems with indefinite data.

1. Сергиенко И.В. Математические модели и методы решения задач дискретной оптимизации. – К.: Наук. думка, 1988. – 472 с.
2. Сергиенко И.В., Каспицкая М.Ф. Модели и методы решения на ЭВМ комбинаторных задач оптимизации. – К.: Наук. думка, 1981. – 288 с.
3. Сергиенко И.В., Шило В.П. Задачи дискретной оптимизации: проблемы, методы исследования, решения. – К.: Наук. думка, 2003. – 264 с.
4. Стоян Ю.Г., Ємець О.О. Теорія і методи евклідової комбінаторної оптимізації. – К.: Ін-т системних досліджень освіти, 1993. – 188 с.
5. Стоян Ю.Г., Ємець О.О., Ємець Є.М. Оптимізація на полірозміщеннях: теорія та методи. – Полтава: РВЦ ПУСКУ, 2005. – 104 с.
6. Стоян Ю.Г., Яковлев С.В. Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования. – К.: Наук. думка, 1986. – 268 с.
7. Ємець О.О., Колечкіна Л.М. Задачі комбінаторної оптимізації з дробово-лінійними функціями. – К.: Наук. думка, 2005. – 118 с.
8. Ємець О.О., Роскладка О.В. Задачі оптимізації на полікомбінаторних множинах: властивості та розв'язування. – Полтава: РВЦ ПУСКУ, 2006. – 129 с.
9. Панишев А.В., Данильченко О.М., Скачков В.О. Вступ до теорії складності дискретних задач. – Житомир: ЖДТУ, 2004. – 236 с.
10. Панишев А.В., Плечистый Д.Д. Модели и методы оптимизации в проблеме коммивояжера. – Житомир: ЖГТУ, 2006. – 300 с.
11. Гуляницький Л.Ф. Розробка моделей і наближених методів комбінаторної оптимізації та їх застосування в інформаційних технологіях: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.05.02. – К.: Ін-т кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 2005. – 32 с.
12. Гребеннік І.В. Математичні моделі та методи комбінаторної оптимізації в геометричному проектуванні: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.05.02. – Харків: Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного, 2006. – 34 с.
13. Павлов А.А., Павлова Л.А. Основы методологии проектирования ПДС-алгоритмов для труднорешаемых комбинаторных задач // Пробл. информатики и управления. – 1995. – № 4. – С. 135–141.
14. Павлов О.А., Павлова Л.О. Принцип розпаралелювання обчислень як засіб підвищення ефективності ПДС-алгоритмів для важкорозв'язуваних комбінаторних задач // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 1997. – № 1. – С. 22–26.
15. Павлов А.А., Ван Инхуэйнь Л.В. Особенности решения NP-трудных задач комбинаторной оптимизации // Информатика та нові технології. – 1997. – № 1. – С. 13.
16. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.
17. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения / Пер. с англ. под ред. Р.Р. Ягера. – М.: Радио и связь, 1986. – 408 с.
18. Ємець О.О., Роскладка А.А., Ємець Ол-ра О. Задача евклідової комбінаторної оптимізації в умовах невідзначеності // Зб. наук. праць Хмельницького нац. ун-ту. Сер. Фізико-математичні науки. – 2005. – Вип. 1. – С. 40–45.
19. Роскладка А.А., Ємець А.О. Решение одной комбинаторной задачи упаковки с учетом неопределенности данных, описанной нечеткими числами // Радиоэлектроника и информатика. – 2007. – № 2. – С. 132–141.

Рекомендована Радою
Навчально-наукового комплексу
"Інститут прикладного системного
аналізу" НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
3 грудня 2007 року

УДК 004.75

П.П. Маслянюк, А.С. Вознюк,
С.С. Вознюк

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБІВ І РОЗРОБКА КОМПОНЕНТНОЇ МОДЕЛІ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ АНАЛІЗУ ДАНИХ

Вступ

Фундаментальні положення системного аналізу і теорії систем [1–5] є теоретичною основою сучасної методології системної інженерії проектів інформатизації організаційних систем (Орг.С) [6].

Як і раніше в наших статтях, під визначенням “інформатизація організаційних систем” ми розуміємо необхідну і достатню множину правових, організаційних, економічних, наукових та науково-технічних рішень і процесів для створення інформаційно-комунікаційних систем з метою задоволення інформаційних потреб, забезпечення і автоматизації бізнес-процесів, підтримки прийняття рішень та підвищення ефективності управління Орг.С із застосуванням інформаційно-комунікаційних технологій [7]. З точки зору системного проектування інформаційно-комунікаційних систем (ІКС), в статті [7] пропонується визначення: “інформаційно-комунікаційна система (ІКС) — це множина сутностей і обумовлених зв'язків між ними, яка забезпечує досягнення мети інформатизації Орг.С за допомогою інформаційно-комунікаційних технологій [7]”. Спираючись на ці визначення, пропонується метамодель бізнес-моделювання системного проектування ІКС.

На цій основі в статті [8] досліджується ідея застосування системного аналізу і теорії систем для визначення системного критерію поділу проектів інформатизації на частини не за функціональною ознакою, а за загальносистемними ознаками. Це дає можливість істотно вдосконалити ітеративний процес інформатизації організаційних систем і забезпечити представлення проекту інформатизації як системи всіх сутностей інформатизації і відношень між ними. Зокрема, в [9] процес розробки визначається як певним чином упорядкований, достатній і функціонально повний ряд робіт з розробки проектів інформатизації організаційних систем із заданими показниками ефективності та

пропонується компонентний процес розробки проектів інформатизації, який зберігає переваги ітеративного і водоспадного процесів, значно розширює можливості проектування середніх та великих інформаційно-комунікаційних систем.

Визначення системного критерію поділу проектів інформатизації на частини не за функціональною, а за загальносистемними ознаками та застосування компонентного процесу розробки проектів інформатизації дають змогу істотно вдосконалити і систематизувати процеси системного проектування проектів інформатизації Орг.С незалежно від типу чи класу ІКС.

Накопичення даних, інформації і знань, створення корпоративних і публічних інформаційних ресурсів потребує розробки відповідних методів та інформаційно-комунікаційних систем обробки і аналізу даних (data processing system, data analysis system).

Постановка задачі

Мета статті — дослідження існуючих методів і засобів обробки і аналізу даних, формалізація процесів обробки даних та їх аналізу, розробка компонентної моделі інформаційно-комунікаційної системи обробки і аналізу даних на основі об'єктно-орієнтованого підходу. Об'єктом дослідження є методи і засоби обробки та аналізу даних, а предметом дослідження — бізнес-процеси створення компонентної моделі інформаційно-комунікаційної системи аналізу даних.

Конвергенція процесів обробки і аналізу даних

Існує багато, іноді досить суперечливих, визначень понять “обробка даних” і “аналіз даних” [10–32].

Обробка даних (data processing). Обробка даних інтерпретується по-різному. Це:

- процес виконання послідовності операцій над даними [10];
- проведення комп'ютером послідовності операцій над даними з метою отримання, класифікації чи перетворення інформації [11];
- операції, проведені над даними з метою надання корисної для користувачів інформації [12];
- організація даних з метою продукування потрібної інформації, що вміщує в собі запис, класифікацію, сортування, узагальнення, підрахунок, поширення та збереження даних [13];

- перетворення сирих (початкових, вхідних) даних у форму, придатну для аналізу за допомогою комп'ютерів [14];

- систематичне проведення послідовності дій над даними, яке може виконуватися ручним способом, механічними, електромеханічними чи електронними (насамперед комп'ютерними) засобами [15];

- систематичне проведення операцій з даними, таких, як сортування, об'єднання, підрахунок, збереження; цей термін є синонімом до словосполучення "обробка інформації" [16];

- будь-яка операція, проведена з даними [17];

- виконання систематичної послідовності операцій над даними з метою перетворення їх в інформацію [18];

- будь-який комп'ютерний процес, що перетворює дані в інформацію або знання; зазвичай, припускається, що цей процес є автоматизованим [19];

- будь-яка техніка з множини технік, в яких над даними проводяться маніпуляції або дані отримуються, зберігаються, класифікуються, передаються чи подаються таким чином, щоб створити інформацію [20];

- послідовність операцій, які виконуються над даними, наприклад операцій об'єднання, перевірки, арифметичних операцій тощо [21];

- процес зведення даних до вигляду, необхідного для використання інформаційного ресурсу. Розрізняють три групи операцій обробки даних: введення вхідних даних, їх обробка, отримання і аналіз вихідних даних [22].

Далі будемо розуміти поняття "обробка даних" у визначеннях [18, 19].

Аналіз даних (data analysis). Аналіз даних авторами трактується як:

- процес перегляду і узагальнення даних з метою виділення корисної інформації та отримання висновків [23];

- систематичне вивчення даних таким чином, щоб їх значення, структура, зв'язки, походження ставали зрозумілими [24];

- процес систематичного застосування статистичних методів і правил логіки для опису, узагальнення та порівняння даних [25];

- організація і дослідження зібраних даних з використанням графіки, графів чи таблиць [26];

- етап процесу дослідження, який оцінює вторинні та/або первинні дані і зв'язує їх із визначеним питанням чи проблемою [27];

- обробка інформації, зібраною з метою отримання висновків [28];

- надання змісту масивним об'ємам інформації [29];

- перетворення даних із метою добування корисної інформації і спрощення отримання висновків. Залежно від типу даних і питання, на яке потрібно дати відповідь, ці перетворення можуть включати застосування статистичних методів, апроксимацію кривих, виділення або видалення певної підмножини даних на основі певного критерію та інші техніки.

На відміну від видобування даних (data mining) аналіз даних, як правило, не направлений на відкриття прихованих (непередбачуваних) закономірностей у даних, а призначений для затвердження чи відкидання існуючої моделі або для виділення параметрів, необхідних для адаптації теоретичної моделі до (експериментальної) реальності [30].

Надалі користуватимемось визначенням [30].

Система обробки даних (data processing system). Система обробки даних – це:

- поєднання апаратних та програмних засобів з метою виконання різноманітних операцій з даними за мінімального втручання людини [31];

- система, що вміщує в собі обчислювальні системи і персонал для його обслуговування, який виконує введення, обробку, зберігання, виведення та проводить керування з метою здійснення послідовності операцій з даними [32].

Надалі будемо використовувати визначення [31, 32].

Аналізуючи поняття "обробка даних", "аналіз даних", "система обробки даних" і "система аналізу даних" і співставляючи їх з реальними задачами, чітко бачимо, що в більшості випадків процеси аналізу даних та їх обробки тісно пов'язані один з одним. Оскільки обробка даних, як правило, передбачає щонайменше систематизацію даних, тобто їх аналіз, а власне аналіз даних практично неможливий без їх обробки. Тому автори схиляються до думки, що, з точки зору користувача, це – скоріше, тожні поняття.

Надалі будемо вживати ці поняття в редакції [18, 19, 31, 32].

Система аналізу даних (data analysis system). З точки зору системної інженерії проектів інформатизації Орг.С [7], проектування інформаційно-комунікаційних систем аналізу даних

передбачає створення необхідної і достатньої множини сутностей та обумовлених зв'язків між ними, що забезпечує досягнення мети інформатизації з аналізу даних за допомогою інформаційно-комунікаційних технологій.

Таким чином, під інформаційно-комунікаційною системою аналізу даних ми розуміємо необхідну і достатню множину сутностей і обумовлених зв'язків між ними.

Формалізація дослідницьких процесів у діяльності людини

В основі кожного спланованого дослідження (не обов'язково наукового) лежить дослідницький процес (research process) [33]. Тут і надалі ми пропонуємо під поняттям “дослідницький процес” розуміти всі процеси діяльності людини, що пов'язані з аналізом даних, інформації та знань.

У даній статті розглядається тільки той клас дослідницьких задач і дослідницьких процесів, які можуть бути формалізовані. Формалізація задач – це представлення об'єкта і предмета дослідження засобами штучної мови: “алфавіт”, “лексика”, “синтаксис”, “семантика”. Формалізація дослідницького процесу передбачає створення моделі цього процесу (наприклад, алгоритму чи діаграми діяльності).

Класифікація систем аналізу даних

Для аналізу і проектування доцільно визначити критерії класифікації системи аналізу даних (САД), виходячи із загальносистемних ознак:

- за наявністю засобів забезпечення комунікації між користувачами:

- 1) соціальні САД, що забезпечують комунікацію між користувачами в єдиному інформаційно-комунікаційному середовищі;

- 2) індивідуальні САД, що не надають комунікаційних послуг для користувачів;

- за рівнем і можливостями доступу користувачів:

- 1) закриті або з обмеженим доступом корпоративні САД;

- 2) відкриті або публічні САД, доступ до яких забезпечується за певними правилами для будь-якого користувача;

- за сферою застосування:

- 1) САД, призначені для задач обробки і аналізу даних бізнес-процесів корпоративного сектора економіки, малого та середнього бізнесу;

- 2) САД бізнес-процесів фінансових інститутів;

- 3) САД бізнес-процесів державних інституцій і органів державної влади;

- 4) САД бізнес-процесів соціальної сфери, освіти, культури та медичного обслуговування;

- 5) САД бізнес-процесів наукової діяльності;

- за ступенем віддаленості системи від користувача:

- 1) системи з безпосереднім (локальним) доступом;

- 2) системи з віддаленим доступом;

- за рівнем реалізації:

- 1) САД, реалізовані на автономному ПК;

- 2) розподілені САД;

- за критерієм обмежень на час обробки:

- 1) системи реального часу;

- 2) системи, в яких час обробки не є критичним.

- за способом визначення користувачем алгоритму обробки:

- 1) алгоритм визначається послідовністю завдань для САД без застосування блок-схеми (чи іншого візуального зображення), тобто суть роботи системи зводиться до такої послідовності: обробка–результат–обробка. Одночасно виконується одне перетворення і в кожний момент часу може бути визначене лише одне перетворення, яке буде виконано. Приклади системи: Excel, STATISTICA, Origin. Операції: з меню перетворення, задання параметрів, початок обробки, отримання результатів;

- 2) алгоритм обробки задається за допомогою блок-схеми. Спочатку будується блок-схема алгоритму обробки. В загальному випадку вона має мережну структуру. Приклади блоків: сумування, оцінка спектра, фільтрація. Для блоків передбачена можливість налаштування. Приклади систем: Simulink;

- 3) алгоритм задається у вигляді програми. Приклади: MatLab, MathCAD, Maple;

- 4) алгоритм задається комбінацією попередніх способів. Наприклад, провели перетворення з використанням блок-схеми, а з його результатом працюємо, не використовуючи вже блок-схеми. Аналогічно можна спочатку здійснювати обробку послідовно, а її результат обробити за допомогою програми чи алгоритму, що визначається блок-схемою.

Цілком зрозуміло, що реалізація інформаційно-комунікаційних САД (ІКСАД) у кожному класі має свої особливості, властивості та операції. Однак з точки зору прикладного системного аналізу, ІКСАД у кожному класі мають і багато спільних властивостей та операцій.

Деякі системи мають можливість при виконанні обробки послідовним способом авто-

матично будувати блок-схему. Її можна буде використовувати в майбутньому, щоб відразу провести весь процес перетворень і отримати з вихідних даних остаточний результат, не зосереджуючись на проміжних результатах.

Далі для зручності будемо розглядати компонентний процес створення ІКСАД, спираючись на такі критерії:

- наявність засобів забезпечення комунікації між користувачами;
- рівень і можливості доступу користувачів;
- ступінь віддаленості системи від користувача.

В основі кожної цілісної ІКСАД лежить парадигма, яка визначає її призначення, область застосування та функціональні обмеження. Тому при побудові нової системи важливо насамперед відокремити класи задач, які вона повинна розв'язувати, набір послуг, що вона надаватиме, та цільову аудиторію, потреби якої вона задовольнятиме. З цією метою слід проаналізувати існуючі методи і засоби аналізу даних, тобто провести порівняльний аналіз існуючих рішень з виділенням переваг та недоліків кожного.

Порівняльний аналіз найбільш поширених засобів аналізу даних

Порівняльний аналіз найбільш поширених засобів обробки і аналізу даних наведено в табл. 1.

Проведений аналіз цих рішень показує, що у всіх без винятку засобах повністю відсутня соціальна корпоративна та/або соціальна публічна комунікаційні складові обробки і аналізу даних, що практично всі засоби являють собою спеціалізовані програмні продукти і пакети обробки та аналізу даних, призначені для індивідуальної локальної роботи.

Компонентна модель і специфікація інформаційно-комунікаційної системи аналізу даних

Компонентну модель ІКСАД для забезпечення бізнес-процесів інформатизації Орг.С в частині обробки і аналізу даних наведено на рисунку.

Специфікація компонентної моделі ІКСАД. Формат специфікації компонентної моделі ІКСАД формується за основними загальносистемними ознаками – властивостями і операціями.

Назва: інформаційно-комунікаційна система аналізу даних.

Функціональність:

а) властивості: реалізація мережна; технології: internet, SOA (Service Oriented Architecture), DFS (Distributed Filesystem) тощо;

склад:

1) компонент "Портал ІКСАД" – призначений для створення текстово-графічного зображення всіх доступних для користувача послуг (як соціально-комунікаційного спрямування, так і обчислювального) надання початкової (публічної) інформації про розроблену систему та надання послуги реєстрації нового користувача в системі;

2) компонент "САД" – призначений для надання користувачам середовища для спілкування, взаємодії, обміну думками, алгоритмами, даними, спільного виконання науково-дослідних проектів;

3) компонент "Клієнтське програмне забезпечення ІКСАД" – призначене для надання можливості користувачу виконувати частину роботи (проективання) перебуваючи в режимі "offline" та забезпечення зручного графічного інтерфейсу користувача;

б) операції: множина засобів, що забезпечує соціальну діяльність дослідника: робота з профілем, колегами, групами, новинами, подіями. Множина засобів для роботи з контентом: публікації, презентації, зображення, відео-записи, аудіо записи; множина засобів для проведення аналізу даних: дані, алгоритми, задачі; множина засобів управління функціонуванням системою: реєстрація, конфігурація тощо.

Інтерфейси:

• DASOut_ExtInfRes (інтерфейс взаємодії із зовнішніми інформаційними ресурсами);

• DASOut_ExtCompRes (інтерфейс взаємодії із зовнішніми обчислювальними ресурсами).

Призначення:

• надати користувачам інтегровану мережну систему збору і аналізу даних та інформаційно-комунікаційне середовище для співпраці;

• забезпечити послуги і сервіси для спілкування, взаємодії, обміну думками, алгоритмами, даними, спільного виконання науково-дослідних проектів;

• створити інформаційний ресурс відкритих дослідницьких проектів, прикладних задач і результатів їх виконання, бібліотеку авторських сайтів дослідників: вчених і спеціалістів, аспірантів і студентів;

• реалізувати персональні і розподілені обчислення для корпоративних та публічних інформаційно-комунікаційних систем аналізу даних.

Таблиця. Порівняльний аналіз засобів аналізу даних

Назва САД	Функціональність		Інтерфейси	Призначення	Повна вартість володіння
	Властивості	Операції			
MatLab & Simulink	Монолітне ядро і набір тулбоксів. Підтримка розподілених обчислень. Широкий спектр алгоритмів, розширення за допомогою тулбоксів. Задання алгоритму за допомогою скрипта (у MatLab) та блок-схеми в Simulink. Можливий віддалений доступ до серверу проведення обчислень	Проведення аналізу даних та моделювання поведінки динамічних систем, генерування коду, звітів, розробка відокреmlених чи вбудованих програм, збір даних, взаємодія з базами даних. Робота з багатомірним сигналом	Передбачені інтерфейси двосторонньої взаємодії з широким класом систем (MathCAD, Origin, WaveWarp). Зовнішні розробники розширюють функціонал MatLab за допомогою тулбоксів	Розв'язання широкого кола задач. Розширення за допомогою тулбоксів. Основні види: оптимізація, розробка систем контролю, статистичний аналіз, обробка сигналів, фінансове моделювання, обчислення зображень, обчислювальна біофізика тощо. Продукт орієнтований на інженерів і науковців	Commercial MatLab 1900\$ Toolboxes 700\$—7000\$ per piece Simulink 3000\$ Extensions 700\$—15000\$ per piece Student MatLab&Simulink (Student version) 100\$ Academic MatLab&Simulink 1000\$ Government MatLab 1900\$ Simulink 3000\$ Additional Services Training Courses Maintenance Service
MathCAD	Монолітне ядро, набір додатків, за допомогою яких розширюється функціонал. Розподілені обчислення не підтримуються. Алгоритм задається за допомогою скрипта. Можливий віддалений доступ до серверу проведення обчислень	Проведення аналізу даних і моделювання поведінки динамічних систем. Алгоритм аналізу його результатів відображаються в одному документі, який є водночас звітом про здійснені розрахунки	Можливе підключення зовнішніх бібліотек функцій. Користувач має засоби для виконання функцій MatLab і Mathematica. Є інтерфейси для виклику функцій MathCAD з інших програм	Аналіз даних, обробка зображень, маркетингування, вейвлет-аналіз, громадянське будівництво, електротехніка	Prices w/o VAT Commercial MathCAD&Addons 1195\$ Student MathCAD 130\$ Additional Services Training Courses Access to eLibrary

Продовження таблиці

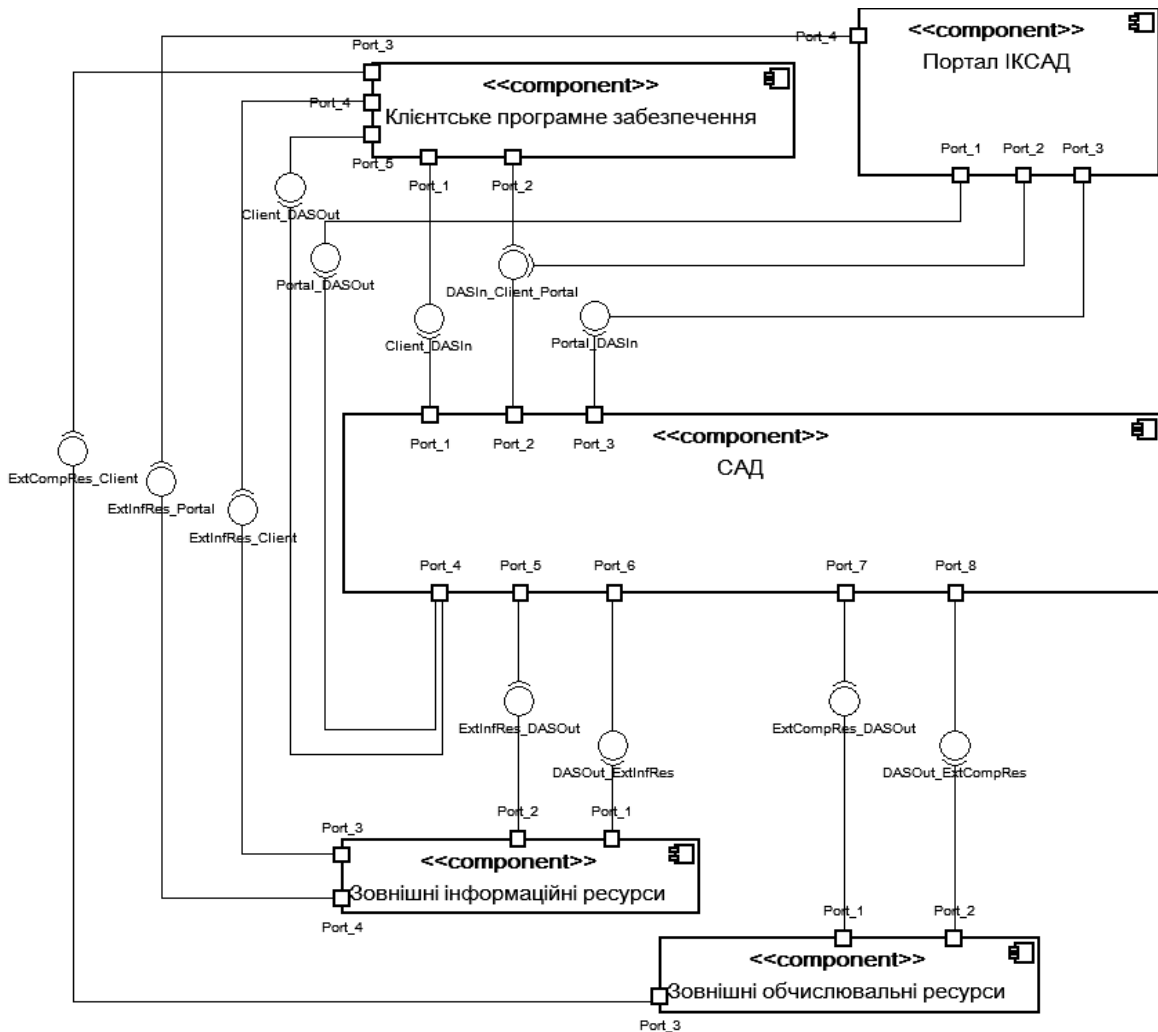
Origin	Монолітне ядро, можливість розширення. Підтримка розподілених обчислень відсутня. Можливість віддаленого доступу відсутня. Алгоритм задається послідовністю операцій над таблицею, можливе написання програм на мові C із використанням бібліотеки функцій NAG, передбачені команди для створення вікон діалогу, підтримка скриптової мови LabTalk	Матричні операції, описова статистика, параметрична перевірка гіпотез, ANOVA, непараметрична перевірка гіпотез, аналіз живучості, обробка і аналіз зображень, експорт і публікація даних, графічної інформації	Передбачена взаємодія з Office Excel, LabView, Mathematica, MatLab	Аналіз даних і візуалізація для науковців та інженерів	<p>Commercial Origin 950\$ OriginPro 1500\$</p> <p>Student Origin Student Version 50\$</p> <p>Academic Origin 500\$ OriginPro 700\$</p> <p>Government Origin 730\$ OriginPro 1070\$</p> <p>Additional Services Maintenance service Upgrade service</p>
Adobe Photoshop	Є можливість розширення функціоналу за допомогою доповнень. Відсутня можливість віддаленої роботи. Розподілені обчислення не підтримуються. Підтримка роботи в пакетному режимі	Робота з кольором, ретушування перетворення, робота з шарами зображення, функції малювання, фільтрація, анімація і відео, веб-графіка, засоби автоматизації (скрипти, пакетна обробка), обробка технічних зображень (DICOM)	Можливість виклику функцій Adobe Photoshop із MatLab	Інтегрований засіб створення і обробки зображень, орієнтований на широкі коло споживачів (професійні фотографі, графічні дизайнери, веб-дизайнери, архітектори і інженери, науковці-дослідники, медичні робітники)	<p>Adobe Photoshop 700\$ Adobe Photoshop Extended 1000\$</p>
Excel	Є можливість підмінення розширень, написаних третьою стороною. Відсутня можливість віддаленої роботи, а також можливість проведення розподілених обчислень.	Функції: роботи з базами даних, з часом і даними, інженерні, фінансові, інформаційні, логічні, математичні, статистичні, текстові	У зв'язку з популярністю програми розробники намагаються забезпечити сумісність своїх пакетів (Origin, MatLab, MathCAD) із MS Excel	Табличний процесор, орієнтований на офісних працівників	MS Office Excel 230\$

Продовження таблиці

Adobe Premier	Монолітне ПЗ. Локальний доступ. Віддалений доступ відсутній. Розподілені обчислення не передбачені	Створення і редагування відео. Фільтрація. Створення форматів відео. Робота із звуковою доріжкою. Інструменти для створення візуальних ефектів. Організація метаданих. Розпізнавання мови у відеозаписі та перетворення її в текстовий вигляд		Інтегрований засіб обробки відеозаписів	Adobe Premier Pro 800\$
WaveWarp	Монолітне ПЗ. Локальний доступ. Віддалений доступ відсутній. Розподілені обчислення не передбачені. Алгоритм обробки задається за допомогою блок-схеми. Надає повний контроль над севедовищем обробки звуку. Можливість обробки сигналів у режимі реального часу	Засоби генерування звуку, фільтрації, змішування і розділення сигналів, керуючі функції	У комплекті поставки є набір функцій для MatLab	Модульна система обробки аудіосигналів у реальному часі, призначена для інженерного, навчального або музичного застосування	WaveWarp 200\$ WaveWarp for MatLab 1000\$
Adobe Lightroom	Монолітне ПЗ без можливості розширення третьою стороною. Локальний доступ. Віддалений доступ відсутній. Є можливість пакетної обробки	Організація бібліотеки зображень (індексація, категоризація), організація метаданих, базава обробка зображень (яскравість, насиченість, контрастність), корекція кольорів, деталізація зображень	Зовнішні інтерфейси відсутні	Інтегрований засіб обробки графічних зображень, орієнтований на фотографів	Adobe Lightroom 300\$

Продовження таблиці

<p>Dataploge</p>	<p>Передбачена можливість розширення функціоналу системи користувачем. Є змога проведення віддаленої роботи (ПЗ функціонує в режимі серверу), використання засобів макропрограмування і підтримка пакетного режиму роботи, багатопоточність і контроль над виконанням завдань. Відсутня можливість проведення розподілених обчислень</p>	<p>Побудова гістограм, обчислення статистики сигналів, робота із сигналом, генерація сигналів, арифметичні операції і математичні функції, аналітичні операції, перетворення Фур'є, лінійні фільтри, вейвлет-перетворення, методи нелінійної динаміки, покращені методи зменшення шуму, апроксимація даних функціями, аналіз зв'язаності складних систем</p>	<p>Є можливість задавати роботи з програмою в режимі командної стрічки, таким чином викликати її з інших програм</p>	<p>Універсальний програмний пакет для аналізу сигналів і часових рядів довільного виду. Області застосування: медицина, біологія і фізіологія, електротехніка, машинобудування, океанографія метеорологія, фінанси і економіка</p>	<p>Program+ Toolboxes Time-unlimited: Academic 2100euro Commercial 3000euro <u>1-Year-License:</u> Academic 700euro Commercial 1000euro</p>
<p>STATISTICA</p>	<p>Локальний доступ. Віддалений доступ за допомогою WebSTATISTICA Server. Передбачена підтримка розподілених обчислень. Робота з великими об'ємами даних. Можливість розширення функціоналу за допомогою DLL</p>	<p>Базова статистика і таблиці, множинна регресія, ANOVA, непараметричні методи, факторний аналіз, кластерний аналіз, аналіз виживання, апроксимація розподілів, загальні регресійні моделі, моделі найменших квадратів, нелінійні оцінки, часові ряд і передбачення, моделювання за допомогою структурних рівнянь, дерева класифікації тощо</p>	<p>Можливість виклику функцій STATISTICA з будь-якої COM-сумісної мови програмування (Visual Basic, C++, C#)</p>	<p>Призначена для статистичного аналізу даних, що вміщує в собі широкій набір аналітичних процедур та методів</p>	<p>Commercial Вартість визначається залежно від конфігурації</p>



Компонентна модель ІКСАД

Висновки

Системна інженерія корпоративних і публічних інформаційно-комунікаційних систем аналізу даних на основі компонентної моделі істотно розширює ефективність виконання бізнес-процесів Орг.С за рахунок реалізації та забезпечення комунікацій між користувачами, між користувачами і ІКСАД, між ІКСАД і зовнішніми інформаційними та обчислювальними ресурсами.

Результати дослідження показали, що на сьогодні не існує цілісної системи підтримки колективного дослідницького процесу. Є лише програмне забезпечення, покликане інформатизувати окремі його етапи чи розв'язання окремих задач.

Перелічимо коротко переваги, які отримають дослідники і Орг.С в цілому від застосування ІКСАД.

1. Гуртування мультидисциплінарної дослідницької спільноти. Корпоративний сектор економіки і наукове співтовариство отримає середовище для продукування, обговорення та поширення результатів досліджень. Це сприятиме міжнародній співпраці, тіснішій взаємодії між окремими спеціалістами і науковцями, між Орг.С та дослідницькими групами.

2. Побудова ІКСАД на принципах соціальних мереж. Таким чином, кожний користувач-дослідник працюватиме, використовуючи власне ім'я, а не мережний псевдонім.

3. Набір уніфікованих інструментів для збору і аналізу даних.

4. Упорядкування бізнес-процесів обробки і аналізу даних методами фізичної структуризації та логічної сегментації ІКСАД.

П.П. Маслянюк, А.С. Вознюк, С.С. Вознюк

ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДСТВ И РАЗРАБОТКА КОМПОНЕНТНОЙ МОДЕЛИ ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ

Исследованы существующие методы и средства обработки и анализа данных. Проведена формализация процессов обработки и анализа данных. Разработана компонентная модель информационно-коммуникационной системы обработки и анализа данных на основе объектно-ориентированного подхода.

P.P. Maslyanko, A.S. Voznyuk, S.S. Voznyuk

THE RESEARCH OF MEANS AND DEVELOPMENT OF COMPONENT MODEL OF INFORMATION-COMMUNICATION SYSTEM OF DATA ANALYSIS

We conduct the research of the existing methods and means of data processing and analysis. Specifically, we endeavour to formalize data processing and analysis. Through experiments performed, we develop the component model of information-communication system of data processing and analysis on the basis of the object-oriented approach.

1. *Згуровський М.З., Панкратова Н.Д.* Системний аналіз: проблеми, методологія, застосування. – К.: Наук. думка, 2005. – 744 с.
2. *Згуровський М.З., Родіонов М.К., Жилієв І.Б.* Розвиток інформаційного суспільства в Україні. – К.: НТУУ "КПІ", 2006. – 544 с.
3. *Ericsson H.-E. Magnus Penker* – Business Modeling with UML: Business Patterns at work – Wileu Computer Publishing, 2000. – 350 p.
4. *Unified Modeling Language Specification, Version 2.0.* Object Management Group, Framingham, Mass., 2004. www.omg.org.
5. *James Rumbaugh, Ivar Jacoson, Grady Booch.* The Unified Modeling Language Reference Manual, Second Edition 2004, by Pearson Education, Inc.
6. *Маслянюк П.П.* Концепція інформатизації корпоративних структур // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2001. – № 3. – С. 45–50.
7. *Маслянюк П.П.* Основні положення методологій системного проектування інформаційно-комунікаційних систем // Там же. – № 6. – С. 54–60.
8. *Маслянюк П.П.* Системне проектування процесів інформатизації // Там же. – 2008. – № 1. – С. 28–36.
9. *Маслянюк П.П.* Компонентні процеси системного проектування інформаційно-комунікаційних систем // Там же. – 2008. – № 2. – С. 112–121.
10. www.glossary.ru/cgi-bin/gl_sch2.cgi?ROhwhguyqg!kgtt:
11. www.wordnet.princeton.edu/perl/webwn.
12. www.nursing-informatics.com/kwantlen/glossary.html.
13. www.dmdsurveys.com/dmd_site3/terminology_pages/terminology_d.html.
14. www.helid.desastres.net.
15. www.epa.gov/records/gloss/gloss03.htm.
16. www.sam.dgs.ca.gov/TOC/4800/4819.2.htm.
17. www.energyweb.net/oil/jargon/default.asp.
18. www.highered.mcgraw-hill.com/sites/0072440783/student_view0/chapter1/glossary.html.
19. www.en.wikipedia.org/wiki/Data_processing.
20. www.en.wiktionary.org/wiki/data_processing.
21. www.oceaninfo.ru/sprav/termin3a.htm.
22. www.vio.fio.ru/vio_38/cd_site/Articles/Vipusk/docs/05articles.doc.
23. www.en.wikipedia.org/wiki/Data_analysis.
24. <http://www.csumb.edu/site/x7101.xml>.
25. www.epa.gov/evaluate/glossary/d-esd.htm.
26. www.education.jlab.org/beamsactivity/6thgrade/vocabulary/index.html.
27. www.prenhall.com/rm_student/html/glossary/d_gloss.html.
28. www.virtualexplorers.org/ARD/Using/gloss.htm.
29. www.webhost.bridgew.edu/m3franklin/glossaryofterms.htm.
30. <http://www.answers.com/topic/data-analysis?cat=technology>.
31. www.eionet.europa.eu/gemet/concept?cp=1986&langcode=ru.
32. www.sam.dgs.ca.gov/TOC/4800/4819.2.htm.
33. hsc.uwe.ac.uk/dataanalysis/researchProcess.asp.

Рекомендована Радою факультету прикладної математики НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції 16 жовтня 2008 року

УДК 004.896

С.В. Титенко

КОМПЛЕКС МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПОБУДОВИ WEB-СИСТЕМИ БЕЗПЕРЕРВНОГО НАВ- ЧАННЯ

Вступ

Стрімкий розвиток технологій спонукає до змін практично в усіх галузях суспільства. Серед них і освітня галузь, яка останнім часом проходить непростий період трансформацій. На наших очах відбувається бурхливий розвиток і перші кроки практичного застосування дистанційної освіти в Україні. Разом з тим, суспільство очікує реалізації нової концепції в навчанні – “освіта впродовж усього життя” [1]. Стандартні і достатньо статичні п’яти-шестирічні університетські програми не спроможні в усій повноті задовольнити мінливі вимоги ринку праці. Інновації пронизують усі сфери життя, постійно змінюючи попит на різні професії і самі професії, зокрема. Тому освіта не може завершуватись після п’ятого року навчання в інституті чи університеті, вона повинна тривати й надалі. Технології дистанційної освіти мають величезний потенціал відповідей на такий суспільний виклик, надавши зручні механізми підтримки безперервного навчання.

Сьогодні є безліч чудових прикладів Web-систем для організації дистанційного навчання, серед яких Blackboard, WebCt, Moodle, IBM LearningSpace. Такі системи впевнено використовують переваги інформаційних технологій, тоді як дедалі більше доводиться стикатися з потребою в технологіях знань. Так, типова модель використання систем дистанційного навчання передбачає підготовку конкретного навчального курсу в певній предметній області, організацію доступу до матеріалів курсу, організацію спілкування учасників навчального процесу та проходження студентами точок контролю і завершення курсу іспитом. Натомість концепція безперервної освіти ставить свої специфічні вимоги до навчальних систем [2]. Модель освітнього процесу за вимогами безперервного навчання на відміну від класичного дистанційного навчання міститиме такі етапи, як визначення освітніх потреб і цілей учня, визначення вже наявних у учня знань і навичок, які відповідають цілям навчання, та побу-

дова і адаптивна підтримка релевантного індивідуалізованого навчального процесу на основі відомостей, отриманих на першому і другому етапах.

Освітні тенденції і розвиток інформаційних технологій вимагають застосування в системах дистанційного навчання таких характеристик і функцій, як адаптивність і індивідуалізація, врахування попередніх знань і досвіду студентів, більш ефективне керування навчальним контентом з можливістю повторного використання, поступального розвитку і накопичення контенту та міждисциплінарних зв’язків, генерація навчального курсу, інтелектуалізація соціальних мереж для освіти, інтелектуалізація контролю знань [2]. Дослідники в галузі інтелектуальних освітніх систем зробили вагомий внесок у вирішення цих проблем. Згідно з узагальнюючою моделлю адаптивної гіпермедіа-системи АНАМ (Adaptive Hypertext Application Model) [3] до компонентів адаптивної освітньої Web-системи серед інших мають увійти й такі, як модель предметної області, що описує, яким чином навчальна інформація системи структурується і поєднується, модель користувача, що описує, яка інформація про користувача повинна зберігатися в системі та модель викладання, або модель адаптації, яка містить у собі педагогічні правила, котрі визначають, яким чином модель предметної області і модель користувача поєднуються для забезпечення точної адаптації та індивідуалізації.

Огляд існуючих методів і технологій інтелектуальних освітніх Web-систем [2] дає змогу зробити висновки про шляхи вдосконалення моделей, архітектури і функціональності наведених систем з метою забезпечення на їх основі ефективної підтримки безперервного навчання. Зважаючи на аналіз особливостей безперервної освіти, слід зауважити, що адаптивні і інтелектуальні навчальні системи не приділяють достатньо безпосередньої уваги деяким специфічним вимогам безперервного навчання: відповідності архітектури системи явищу “інформаційного вибуху”, професійній спрямованості навчання, міждисциплінарності знань.

Проблема *невідповідності архітектури системи явищу “інформаційного вибуху”* [4] полягає в тому, що часто адаптивні та інтелектуальні навчальні системи сконцентровані лише на проблемах всередині курсу. В той же час, поза увагою залишається той факт, що існує потреба в інтенсивній підтримці великої кількості курсів, які треба постійно створювати у відпо-

відь на розширення цільових для навчання знань. Ця вимога відображається на функціональність засобів створення і збереження навчальних ресурсів. Дана проблема також виражається як проблема систем із контентом закритого типу [5].

Професійна спрямованість навчання передбачає відповідність кадровим потребам підприємств та зв'язок навчання з посадовими обов'язками. Ця потреба описується як актуальність і релевантність навчання та орієнтація на негайне застосування отриманих знань. Більшість адаптивних і інтелектуальних систем навчання не розглядають такі сутності, як посада, професія, компетенція і їх зв'язок із навчальними ресурсами. Незважаючи на те, що багато систем мають на меті передачу процедурних знань (так званих тренажерів), цей клас систем не відповідає завданню систематизації інформаційних навчальних ресурсів у гнучкій відповідності до посадових або професійних обов'язків. Деякі системи класу підтримки виробничої діяльності застосовують модель задач для налаштування навчання [6, 7]. Інтелектуальні системи безперервної освіти мають розвивати і поширювати цей досвід для підтримки безперервного навчання.

Вимога *міждисциплінарності знань*, що мають бути засвоєні в процесі навчання, пов'язана з професійною спрямованістю і відображає необхідність цілісного навчання для певної посадової або професійної позиції. Цим знову підкреслюється недостатність лише одного погляду всередину курсу – потрібен міждисциплінарний рівень. Тому в інтелектуальних системах безперервного навчання слід передбачити наявність єдиної багатопредметної бази навчальних матеріалів та існування в ній міждисциплінарних зв'язків.

Частою проблемою систем у галузі інтелектуального навчання є їх *вузькопрофільність* і тенденція до розв'язання деякої окремої задачі у відриві від реалізації інших функцій навчальної системи [8]. Багато систем, які розв'язують такі задачі, як адаптивна навігація або адаптивне подання контенту [2], не передбачають можливості для створення нової навчальної інформації, маючи контент як незмінну компоненту. Інші системи, вирішуючи питання тестування, не мають інструментів для управління контентом тощо. Існує брак комплексного розв'язання сукупності освітніх задач у рамках однієї системної моделі. Розподілена архітектура KnowledgeTree є одним із прикладів

подолання цієї проблеми [8]. Архітектура передбачає інтеграцію різних підсистем, які відповідають за різну навчальну діяльність. Натомість практика застосування цієї розробки відбувається в межах однієї дисципліни ("мови програмування С"), а алгоритми роботи компонентів системи є предметнозалежними і передбачають наявність відповідної добре формалізованої предметної області [9, 10]. Таким чином, тут ускладнюється забезпечення вимоги міждисциплінарності і керування контентом у різних предметних областях, а також задачі професійної спрямованості навчання, коли цілі відповідають конкретним професійним або посадовим позиціям. Отже, актуальним залишається завдання побудови системи безперервного навчання на основі комплексної моделі, яка забезпечить розв'язання сукупності освітніх задач у межах єдиного інтегрованого підходу.

Постановка задачі

Ставиться задача з пошуку і розробки ключових моделей, які мають лягти в основу інтелектуальної навчальної Інтернет-системи. Підґрунтям для розробки моделей повинні стати системні дослідження в сукупності галузей, пов'язаних із дистанційним навчанням. Запропоновані моделі відбиватимуть такі сутності і проблеми дистанційного навчання, як навчальний контент, його змістова і структурна складові, автоматизація контролю знань, знання про професії та їх зв'язок з предметом навчання, способи налаштування системи на індивідуальний навчальний процес і технології адаптації, організаційна, соціальна і формальна складові начального процесу. Зважаючи на це, ми ставимо за мету розробити комплекс взаємно інтегрованих моделей, на основі яких стане можливою програмна реалізація інтелектуальної освітньої Web-системи з великим ступенем автоматизації різних процесів дистанційного навчання. Така комплексна модель синтезуватиме в собі сукупність підлеглих моделей, які, в свою чергу, описують структури і методи підтримки різних освітніх процесів. Вимоги і підзадачі, що мають розв'язуватись на основі комплексної моделі, такі:

- створення єдиного інтегрованого багатопредметного сховища навчальних матеріалів на противагу набору відокремлених навчальних курсів;
- формалізація навчального контенту і реалізація концепції інтелектуального навчаль-

ного контенту, відповідно до якої інтелектуальне керування поданням навчальних матеріалів реалізується на основі попередньо створеного інтелектуального контенту [11];

- генерація і автоматизована перевірка та аналіз тестів;
- розробка моделі професійних компетенцій як засобу моделювання навчальних цілей;
- реалізація концепції освітнього запиту; налаштування навчального процесу і навчаючого середовища на основі моделювання цілей в освітньому запиту;
- адаптивне подання навчального контенту і реалізація технологій адаптації навчання.

Сукупність моделей для навчаючого гіпермедіа-середовища

Розв'язання поставленої задачі досягається розмежуванням роботи системи на два рівні: рівень управління знаннями та рівень організації безперервного навчання. Управління знаннями має за мету формування дидактично-орієнтованої бази знань предметної області, по якій відбувається навчання. Організація безперервного навчання здійснюється на основі використання формалізованих знань, які отримуються на першому рівні роботи з системою. Подамо перелік моделей, які відповідають за різні процеси і разом інтегруються в єдину комплексну модель навчаючого гіпермедіа-середовища для підтримки безперервного навчання через Інтернет.

Рівень управління знаннями

На рівні управління знаннями розв'язуються такі задачі, як структурування освітнього контенту, формалізація зв'язків і співвідношень ділянок навчальних матеріалів, формалізація змісту навчальних текстів і семантичне моделювання предметної області для освітніх цілей, а також моделювання компетенцій, професій і посадових інструкцій, що вимагається професійно-орієнтованими принципами безперервної освіти [2]. Все це вирішується на основі трьох моделей: ієрархічно-мережної моделі організації контенту Tree-Net, понятійно-тезисної моделі формалізації дидактичного тексту і моделі професійних компетенцій.

Ієрархічно-мережна модель організації навчального контенту Tree-Net. Tree-Net відповідає за структуру зберігання всієї сукупності нав-

чальних матеріалів [12]. Формалізується семантико-дидактична структура, зв'язки і співвідношення дидактичних матеріалів. Модель служить для управління знаннями на двох рівнях: всередині певного курсу, глобальною сукупністю всіх курсів і навчальних елементів. Вона є безпосередньою базою для генерації і подання контенту навчаючого гіпермедіа-середовища.

Сукупність елементів контенту або Web-сторінок задається множиною $V = \{v_1, \dots, v_n\}$. Ієрархія контенту визначається відображенням $Ch: V \rightarrow 2^V$, що ставить у відповідність кожному елементу контенту v_i множини його дочірніх елементів. Для визначення множини всіх нащадків елемента контенту v використовується оператор $Desc(v)$. Для позначення множини елементів контенту, які мають логічну і структурну єдність, єдине джерело походження, наприклад одне авторство, і подають одну тему, вводиться поняття *семантичного блока* контенту. Фізично семантичний блок є деякою гілкою в ієрархії контенту. Множина елементів семантичного блока визначається оператором $Desc(v)$, де v – вершина блока в дереві контенту. *Мережна структура* контенту служить для встановлення бінарних зв'язків асоціативності між елементами контенту. Кожен елемент має сукупність пов'язаних з ним елементів, що задається відображенням $N: V \rightarrow 2^V$. Множина $G = \{g_1, \dots, g_n\}$ вказує на сукупність тематичних груп, в яких можуть брати участь елементи контенту. Тематичні групи структуруються в ієрархію, яка задається відображенням $ChG: G \rightarrow 2^G$. Множина нащадків групи g , де $g \in G$, визначається оператором $DescG(g)$. Для визначення ж множини нащадків множини груп $A \subseteq G$ використовується оператор $DescGG(A)$. Кожен елемент контенту може брати участь у довільній кількості тематичних груп, що задається відображенням $GV: V \rightarrow 2^G$.

Понятійно-тезисна модель (ПТМ). ПТМ – модель формалізації дидактичного тексту [13–15]. Вона відповідає за формалізацію вмісту навчальних матеріалів. Навчальний текст формалізується виділенням семантико-дидактичних елементів. Формалізація відбувається всередині фрагменту навчального тексту із врахуванням загальної структури навчального курсу. Модель використовується також для автомати-

зації побудови засобів контролю знань, що, в свою чергу, застосовується для адаптації навчального процесу.

Основними семантичними сутностями ПТМ є *поняття* і *тези*. Поняття виражає предмет знань, який обговорюється в тому чи іншому фрагменті навчального матеріалу. Теза — це деяка відомість або твердження про поняття. Кожному поняттю відповідає власний набір тез, добутих із тексту, які характеризують дане поняття: множина понять — $C = \{c_1, \dots, c_{n2}\}$, множина тез — $T = \{t_1, \dots, t_{n1}\}$, множина елементів контенту — $V = \{v_1, \dots, v_{n3}\}$. Кожний елемент контенту v_i може мати довільну кількість тез t_j — $TV : V \rightarrow 2^T$. Кожна теза t_j стосується одного елемента контенту v_i — $VT : T \rightarrow V$. Кожне поняття c_k може мати довільну кількість тез t_i . Приналежність тез до понять задається відображенням $CT : T \rightarrow C$. Кожне поняття має деякий набір тез, що задається відображенням $TC : C \rightarrow 2^T$.

Модель професійних компетенцій (МПК).

МПК моделює знання про спеціальності, професії і посади. Моделювання компетенцій є одним з основних методів забезпечення релевантності безперервного навчання [16]. Як пропонується в [16], кожна навчальна діяльність повинна безпосередньо пов'язуватись із професійними очікуваннями або вимогами. Для цього використовуються посадові інструкції і ключові посадові завдання. Таким завданням має бути поставлений у відповідність навчальний контент.

У МПК моделюються і описуються конкретні професійні компетенції (знання, навички, уміння), з сукупності яких формується загальна картина певної спеціальності (професії). Модель зорієнтована на конкретні професії і посади, на які є попит на ринку праці.

У праці [17] аналізуються професії, будуються так звані професіограми, робиться психологічний аналіз професії, а в [18] розглядаються професійні компоненти в підготовці фахівців у вищих навчальних закладах, аналізуються нормативні документи, що описують професії, і їх зв'язок з освітніми стандартами. Ідеї і методи генерації комплексного навчального курсу на основі стартових знань і навичок студента та вимог до бажаної посади розглядаються в [19]. Там же пропонується варіант моделі

посадових компетенцій і їх зв'язок із навчальним контентом. Ці та інші праці, а також державні стандарти та нормативні документи можуть стати підґрунтям для подальших досліджень зі створення МПК для описуваної системи.

МПК реалізується завдяки зв'язкам з навчальним контентом (ПТМ і Tree-Net) і служить для моделювання цілей навчання і формування освітнього запиту до системи. Модель призначена для подальшого використання для генерації навчаючого гіпермедіа-середовища у відповідь на освітній запит користувача і грає ключову роль в організації роботи дистанційної освітньої системи за парадигмою безперервного навчання.

Для структурування множини компетенцій $S = \{s_i\}, i = 1, \dots, n_S$, використовується ієрархічно-мережний підхід моделі Tree-Net: ієрархія компетенцій — $ChS : S \rightarrow 2^S$, батьківські зв'язки — $FS : S \rightarrow S$, мережні зв'язки між компетенціями — $NS : S \rightarrow 2^S$. Аналогічно у відповідності до Tree-Net-моделі організуються асоціативні групи компетенцій, а також створюється структура для підтримки збереження різнотипних наборів і підмножин компетенцій. Зв'язок контенту і компетенції задається відображеннями $VS : V \rightarrow 2^S$ і $SV : S \rightarrow 2^V$, а зв'язок понять і компетенцій — відображеннями $SC : S \rightarrow 2^C$.

За допомогою компетенцій можна будувати *профіль спеціаліста*. Для цього окреслюється коло компетенцій, які відповідають даному профілю: $Exp = \{exp_1 : exp_i \in 2^S\}$ — множина спеціалістів, які моделюються в системі, exp_i — профіль спеціаліста на основі компетенцій.

Рівень організації безперервного навчання

На рівні організації безперервного навчання в системі розв'язуються такі задачі, як реалізація індивідуалізованого навчання, постановка освітнього запиту для ініціалізації персонального освітнього простору, побудова індивідуального навчального курсу, автоматизований контроль і діагностика знань, стратегії адаптації навчання, організація взаємодії учасників навчального процесу. На цьому рівні моделюються інформаційні структури для опису освітніх цілей, реалізації педагогічних стратегій і адаптації навчання, подаються методи організації навчального процесу. Ці задачі розв'язуються на основі таких моделей, як модель ос-

вітнього запиту, модель учня, модель контролю і діагностики знань та стану навчання, модель викладання і педагогічних стратегій, організаційна модель навчання.

Модель контролю і діагностики знань та стану навчання (МКД). МКД подає технології генерації і автоматизованого аналізу тестів і реалізується на основі КМК. При цьому будівельним матеріалом тестових завдань є семантичні сутності ПТМ. ІММ використовується для зв'язку між завданнями тестів і конкретною порцією навчального контенту. МКД служить також для перевірки досягнення цілей навчання, поданих за допомогою моделі професійних компетенцій (МПК). Технологія побудови тестів на основі понятійно-тезисної моделі розглянута в попередніх працях автора [13–15].

Модель учня (МУ). МУ описує цілі, рівень знань, навичок, стиль навчання і роботи з навчальними матеріалами. Вона зберігає власні уподобання учня щодо налаштування навчального гіпермедіа-середовища. МУ структурно будується на основі Tree-Net, ПТМ, МПК і моделі освітнього запиту.

Множиною учнів у системі є $L = \{l_i\}$, де $i = 1, \dots, n_L$. Кожен учень може вивчати певну кількість курсів, що задається відображенням $LE: L \rightarrow 2^E$. Цільовий контент учня – $LV\text{Aims}: L \rightarrow 2^V$, цільові курси учня – $LE\text{Aims}: L \rightarrow 2^E$, цільові компетенції учня – $LS\text{Aims}: L \rightarrow 2^S$. При цьому множина цільових компетенцій може бути попередньо визначеним профілем спеціаліста $\text{exp}_i \in \text{Exp}$, $\text{exp}_i \in \{s: s \in S\}$. Цільові поняття учня – $LC\text{Aims}: L \rightarrow 2^C$. Таким чином, цілі учня задаються множиною $LA\text{ims} = \{LV\text{Aims}, LE\text{Aims}, LS\text{Aims}, LC\text{Aims}\}$.

Модель знань учня будується за принципами оверлейної моделі. Засвоений матеріал задається відношенням $LV \subseteq L \times V$, яке, в свою чергу, задається матрицею $LVw = \|lvw_{ij}\|$, де lvw_{ij} – числове вираження рівня засвоєння i -м учнем j -ї ділянки контенту. Аналогічно засвоєні поняття і компетенції задаються відповідно відношеннями $LC \subseteq L \times C$ і $LS \subseteq L \times S$. Загальна модель здобутків або знань учнів – $L\text{Know} = \{LV, LC, LS\}$. Таким чином, комплексна модель учня об'єднує інформацію про його курси, його цілі і знання: $L\text{Model} = \{LE, LA\text{ims}, L\text{Know}\}$.

Модель освітнього запиту (МОЗ). МОЗ – сукупність структур і методів для реалізації запиту до системи на освітні послуги. Запит будується на основі Tree-Net і ПТМ та може містити в собі інформацію про цільові навчальні матеріали, професійні компетенції, посаду чи спеціальність.

МОЗ призначена для ініціалізації індивідуального навчального процесу. Після надходження освітнього запиту, сформованого користувачем, відбувається налаштування нового освітнього процесу, фіксуються цілі навчання, створюється попередня модель учня і викладання, окреслюється необхідний обсяг навчального контенту та готується попередній контроль. МОЗ служить як механізм налаштування навчального гіпермедіа-середовища. Результатом роботи освітнього запиту є ініціалізація моделі цілей учня $LA\text{ims} = \{LA\text{ims}, LE\text{Aims}, LS\text{Aims}, LC\text{Aims}\}$. Реалізація запиту відбувається на основі користувацького Web-інтерфейсу для ініціалізації навчання і вибору контенту.

Модель викладання і педагогічних стратегій (МВ). МВ описує методики подання навчальних матеріалів, прийняття рішень про сценарій навчання і адаптацію, точки контролю і способи контролю. Вона служить для реалізації ряду педагогічних функцій системи, серед яких генерація, зберігання і адаптація індивідуального навчального курсу, візуалізація і індивідуальне налаштування користувацького інтерфейсу освітнього середовища, а також налаштування навчального процесу і педагогічних стратегій викладачем.

Методика генерації курсу являє собою сукупність інформаційних структур і алгоритмів генерації навчальних курсів з усієї сукупності навчального контенту для даного конкретного навчального процесу. Генерація індивідуального навчального курсу виконується на основі інформації моделей рівня управління знаннями. Перший етап – це підготовка всієї вибірки навчального контенту на основі цільового контенту, курсів, компетенцій та профілів спеціаліста, а також цільових понять:

$$V\text{select}_i = LV\text{Aims}_i \cup \left(\bigcup_{j=1}^{J_{LE\text{Aims}_i}} LE\text{Aims}(l_i)_j \right) \times \\ \times \cup \left(\bigcup_{j=1}^{J_{LS\text{Aims}_i}} VS(LS\text{Aims}(l_i)_j) \right) \times$$

$$\times \cup \left(\bigcup_{j=1}^{J_{LCAims_i}} VC(LCAims(l_i)_j) \right).$$

Далі аналізується ієрархія вибраних елементів контенту. По-перше, контент впорядковується в основну деревоподібну структуру, задану у відображенні F . В результаті отримується сукупність піддерев повного дерева контенту системи. Далі знаходяться вершини новоутворених піддерев за допомогою спеціального оператора $Roots : Roots(Vselect_i)$. Кожен з елементів цього набору є вершиною дерева. Кожна з цих вершин являтиме собою дерево новоутвореного курсу, а кількість вершин $|Roots(Vselect_i)|$ вкаже на кількість створених індивідуальних навчальних курсів.

Наступний крок – визначення ключового контенту. Це такий контент, який зустрічається в кожній із цілей учня: серед цільового контенту, контенту, що відповідає цільовим курсам, цільовим компетенціям і поняттям:

$$Vkey_i = LVAims_i \cup \left(\bigcup_{j=1}^{J_{LEAims_i}} LEAims(l_i)_j \right) \times \\ \times \cup \left(\bigcup_{j=1}^{J_{LSAims_i}} VS(LSAims(l_i)_j) \right) \times \\ \times \cup \left(\bigcup_{j=1}^{J_{LCAims_i}} VC(LCAims(l_i)_j) \right).$$

Таким чином, на основі цілей $L Aims(l_i)$ за допомогою алгоритмів генерації на виході отримується вибірка цільового контенту $|Roots(Vselect_i)|$ і кількість $(Vselect_i)$ навчальних курсів, а також разом з ними елементи контенту $Vkey_i$, позначені як найбільш релевантні потреби учня l_i .

Курси, отримані в результаті роботи методів генерації курсів, фіксуються і зберігаються за допомогою спеціальних структур, що описують вибірки контенту. У процесі навчання застосовуються технології адаптації навчального курсу, що реалізуються на основі інформації моделі учня і результатів контролю знань на базі моделі контролю та діагностики.

Засоби налаштування стратегій викладання служать для конструювання і налаштування власної моделі викладання методичним персо-

налом, яка може застосовуватись для окремих курсів і навчальних процесів.

Організаційна модель навчання (ОМН). Ця модель описує організаційні сторони дистанційного навчання, служить для вирішення таких завдань, як питання доступу, облікові записи, ролі користувачів, часова організація, розклад, особистий склад учасників конкретного навчального процесу, фінансові питання, функціонування електронного деканату тощо. До неї як підмодель слід віднести і модель освітньої спільноти (МОС), що служить для організації взаємодії через Інтернет учасників навчального процесу. Сюди слід віднести й такі традиційні засоби спілкування, як електронне листування, форуми, блоги, а також wiki-системи. Метою МОС є опис єдиної моделі різнотипної взаємодії під час навчання та її інтеграція з іншими моделями.

Схематичне зображення комплексної моделі Web-системи безперервного навчання показано на рис. 1.

Першим кроком до використання системи є підготовка дидактичних матеріалів. Далі ці матеріали формалізуються і передаються в комплексну базу знань навчального контенту (рівень управління знаннями), що виражаються двома взаємопов'язаними рівнями у відповідних моделях: понятійно-тезисній моделі (ПТМ) і ієрархічно-мережній моделі (Tree-Net) організації навчального контенту. Крім того, експертами готується система професійних компетенцій (МПК), і встановлюються зв'язки відповідності між компетенціями і елементами бази знань навчального контенту. Користувач взаємодіє з освітньою системою і за допомогою системи професійних компетенцій формується запит на формування освітнього процесу (МОЗ). Особливу роль відіграють моделі рівня організації безперервного навчання, які "вміють" використовувати закладені в систему дидактично-орієнтовані знання предметної області і описання професій для формування адекватного навчального процесу. Навчальний процес відбувається за допомогою інтелектуального навчаючого середовища на основі гіпертексту і гіпермедіа, що автоматично генеруються в процесі взаємодії користувача з системою (МВ). У процесі навчання і проходження студентом контролю знань (МКД) система акумулює знання про учня (МУ) і адаптується до його поточних потреб за допомогою всіх складових бази знань (МВ). Організаційні і адміністративні аспекти, а також форма навчання

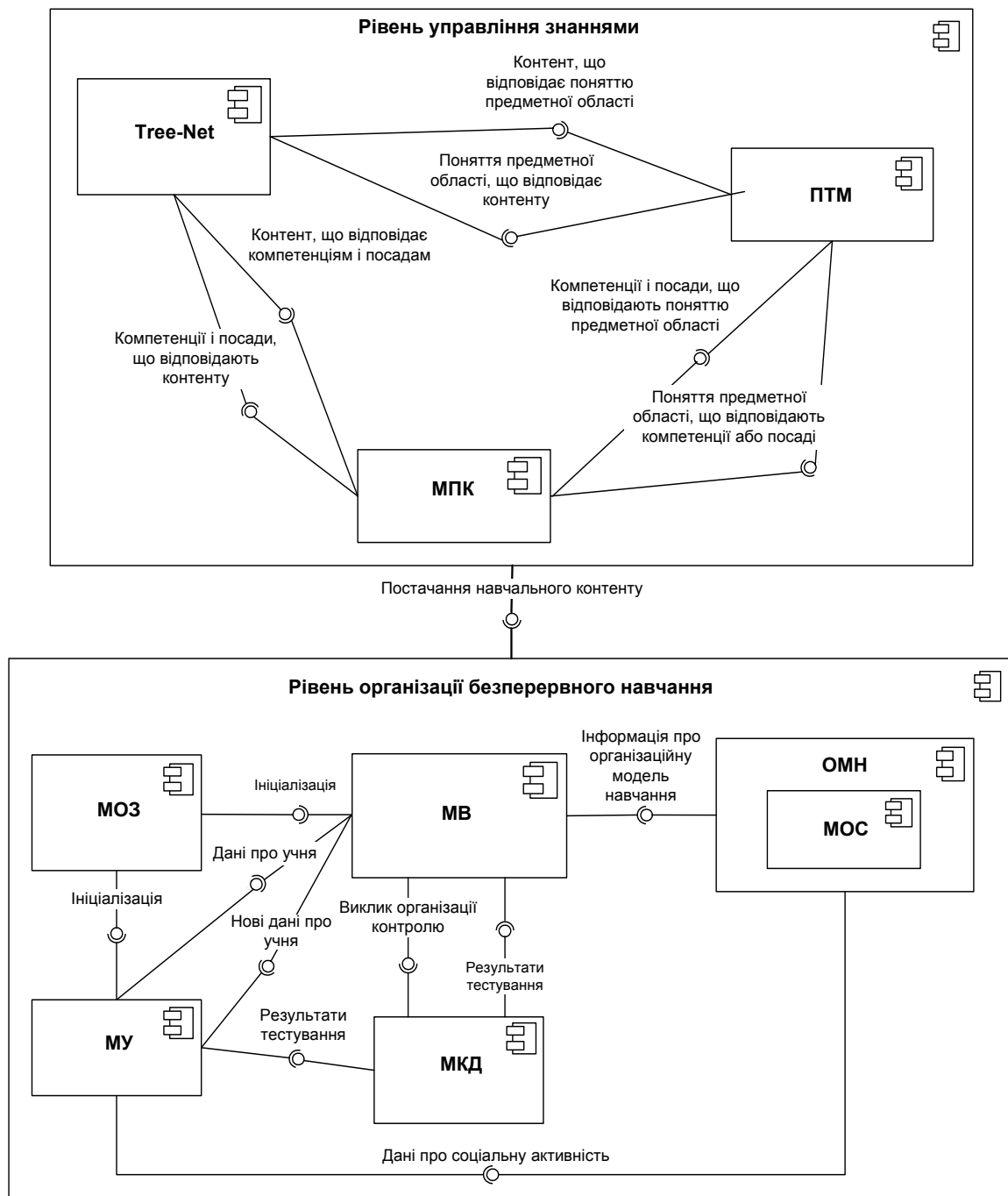


Рис. 1. Структурна схема комплексної моделі Web-системи безперервного навчання. Діаграма компонентів у нотатції UML

налаштовуються у відповідній підсистемі (ОМН). Соціальна складова навчального процесу підтримується за допомогою організації освітньої Інтернет-спільноти на основі єдиної системи взаємодії учасників навчального процесу (МОС). Архітектуру програмного забезпечення Web-системи безперервного навчання, що ґрунтується на такій комплексній моделі, зображено на рис. 2.

База знань предметної області складається з трьох інформаційних взаємопов'язаних сховищ: бази контенту на основі Tree-Net, понятійно-тезисної бази і компетенції. Відповідно, персоналу системи надаються спеціальні інструментальні засоби формування і актуалізації такої бази знань. З іншого боку, студент починає свою роботу із системи ініціалізації навчання і вибору цільового контенту, які функ-

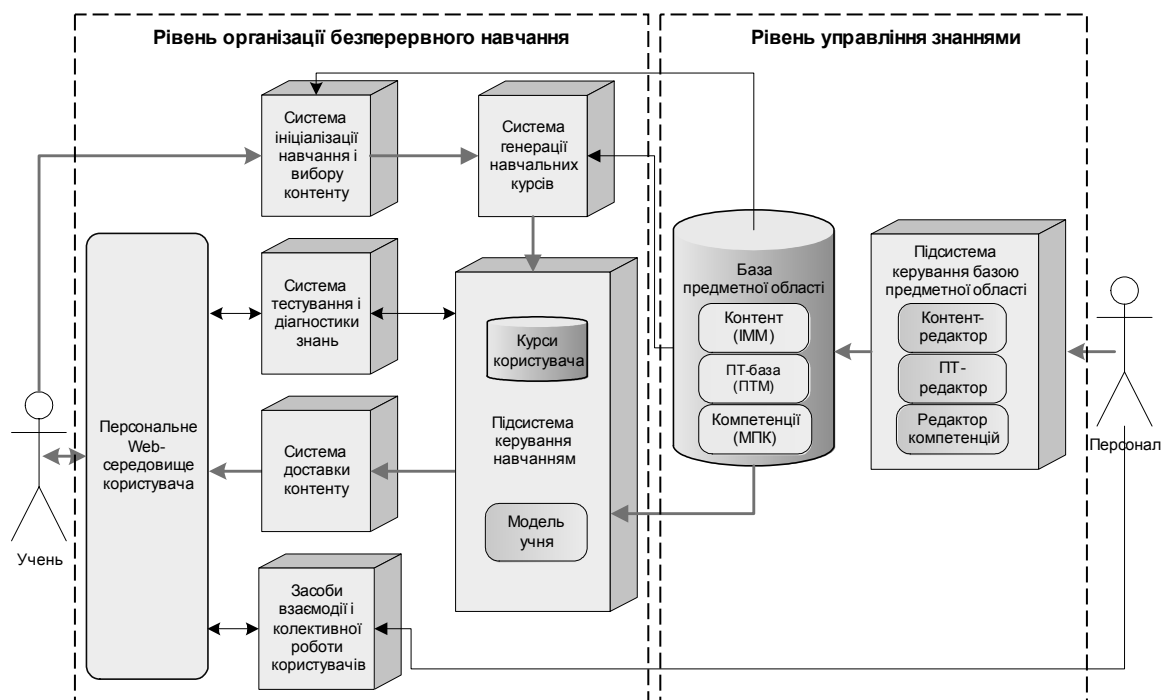


Рис. 2. Архітектура програмного забезпечення Web-системи безперервного навчання

ціонує на основі знань, закладених у базі знань предметної області, і спирається на МОЗ. За результатами цього етапу підсистема керування навчанням генерує персональні навчальні курси студента і зберігає їх за допомогою спеціальних структур. Тут же формується модель учня. Система доставки контенту служить для постачання персонального освітнього контенту курсів студенту. Система тестування і діагностики відповідає за механізми контролю знань. Між учасниками освітнього процесу відбувається взаємодія завдяки засобам колективної роботи.

Висновки

Запропонований комплекс моделей дає можливість системно підійти до побудови інтелектуальної Web-системи для безперервного навчання. Моделі рівня управління знаннями дозволяють розглядати сукупність навчальних матеріалів по всіх дисциплінах як єдине ціле, використовувати міждисциплінарні зв'язки і застосовувати єдині методи управління навчальним контентом на рівні його завантаження і використання під час навчання.

Практика застосування ієрархічно-мережної моделі Tree-Net у розробці FreshKnowledge [20] на сайті дистанційного навчання [21], а

також у багатьох інших інформаційних проєктах (див. [22]) демонструє ефективність підтримки контенту на основі Tree-Net. Модель управління контентом, реалізована в системі, дає можливість перейти від фізичного управління контентом до управління на рівні семантики, що, в свою чергу, значно оптимізує часові витрати на підтримку Web-ресурсів і робить сам ресурс більш інтелектуальним, а його контент – легко доступним.

Понятійно-тезисна модель і її застосування для формалізації змісту дидактичних текстів та автоматизації контролю знань демонструється програмним продуктом EduManager [23] і підсистемою тестування на сайті дистанційного навчання [21]. Робота програми показує переваги понятійно-тезисного (ПТ) підходу порівняно з іншими технологіями генерації тестів на основі методів штучного інтелекту [24, 25]. Серед ключових переваг слід зазначити простоту процесу формування БЗ, достатньо високу лінгвістичну зрозумілість тестових завдань, природний зв'язок тестових завдань із навчальним матеріалом, що надає підґрунтя для технологій адаптації навчання. Порівнюючи ПТ-підхід із ручним формуванням тестів, слід зазначити, що ПТ-підхід потребує менших зусиль на підготовку БЗ, ніж на ручну підготовку тестів.

Системний опис комплексної моделі для побудови інтелектуального навчаючого Інтернет-середовища є фундаментом для подальших досліджень і вдосконалення програмної реалізації. Результати досліджень активно впроваджу-

ються в реальних і експериментальних проектах [20–23]. Про поточні і попередні результати інформується на сайті авторів www.setlab.net [22].

С.В. Титенко

КОМПЛЕКС МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ WEB-СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО ОБУЧЕНИЯ

Представлен комплекс моделей, которые служат основанием для программной реализации автоматизированной системы непрерывного обучения. С помощью рассмотренных моделей решаются такие задачи, как создание многопредметного хранилища учебных материалов, многоуровневая формализация учебного контента, автоматизация тестирования и диагностики знаний, генерация индивидуального учебного курса и адаптация учебного процесса к потребностям обучаемого.

S.V. Tytenko

THE SET OF MODELS FOR BUILDING THE ONGOING LEARNING WEB-SYSTEM

This paper presents a set of models, providing the software implementation of automated system for ongoing learning. Furthermore, using these models, the following tasks are solved: the creation of multi-subject storage of learning materials; multi-level learning content formalization; automation of knowledge diagnosis and testing; generation of individual learning course and adaptation of learning process to learners' needs.

1. *Тімар Т., Дарваш П., Коварович Я., Поулсен С.* Коментарі до Національної доктрини розвитку освіти України (аналіз проекту освітньої доктрини від 15 травня 2001 р.) // Бюлетень Програми підтримки вироблення стратегії реформування освіти № 2 червень/липень 2001, <http://www.irf.kiev.ua/old-site/ukr/programs/edu/2001/bulletin-02.pdf>
2. *Гагарін О.О., Титенко С.В.* Дослідження і аналіз методів та моделей інтелектуальних систем безперервного навчання // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2007. – № 6. – С. 37–48.
3. *De Bra P., Houben G.J., Wu H.* Aham: A dexter-based reference model for adaptive hypermedia // Proceedings of the ACM Conference on Hypertext and Hypermedia. – Darmstadt, Germany, 1999. – P. 147–156.
4. *Черняк Л.* Адаптируемость и адаптивность // Открытые системы #09/2004 <http://www.osp.ru/os/2004/09/184560/>
5. *Brusilovsky P., Henze N.* Open corpus adaptive educational hypermedia // P. Brusilovsky, A. Kobsa and W. Neidl (eds.): The Adaptive Web: Methods and Strategies of Web Personalization. Lecture Notes in Computer Science. – Berlin Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2007. – Vol. 4321. – P. 671–696.
6. *Brusilovsky P. and Cooper D.W.* Domain, Task, and User Models for an Adaptive Hypermedia Performance Support System // Gil, Y. and Leake, D. B. (eds.) Proc. of 2002 International Conference on Intelligent User Interfaces. – San Francisco, CA, ACM, 2002. – P. 23–30.
7. *Vassileva J.* A task-centered approach for user modeling in a hypermedia office documentation system, User Modeling and User-Adapted Interaction, 1996. – 6 (2-3).
8. *Brusilovsky P.* KnowledgeTree: A distributed architecture for adaptive e-learning // Nall J. and Robson R. (eds.) Proceedings of The Thirteenth International World Wide Web Conference, WWW 2004 (Alternate track papers and posters), New York, NY, May 17–22, 2004. – ACM Press. – P. 104–113.
9. <http://adapt2.sis.pitt.edu/cbum/> – ADAPT2. Advanced Distributed Architecture for Personalized Teaching & Training.
10. http://www.sis.pitt.edu/~paws/system_quizguide.htm – QuizGuide
11. *Brusilovsky P., Knapp J. and Gamper J.* Supporting teachers as content authors in intelligent educational systems // Int. J. Knowledge and Learning. – 2006. – Vol. 2, Nos. 3/4. – P. 191–215.
12. *Титенко С.В., Гагарін О.О.* Моделювання області знань в системі безперервного навчання на основі інтеграції моделі контенту Tree-Net і понятійно-тезисної моделі // VIII Міжнарод. конф. “Інтелектуальний аналіз інформації ІАІ-2008”, Київ, 14–17 мая 2008.: Сб. тр./ Ред. кол.: С.В. Сирота (гл.ред.) і др. – К.: Просвіта, 2008. – С. 475–484.
13. *Гагарин А.А., Луценко А.Н., Титенко С.В.* Организация дистанционного обучения как информационный фактор реализации научно-технологической состав-

- ляющей экономической безопасности государства // Экономическая безопасность государства и информационные технологии в ее обеспечении / Под общ. ред. Г.К. Вороновского, И.В. Недина. – К.: Знання України, 2005. – С. 608–619.
14. *Титенко С.В., Гагарін О.О.* Семантична модель знань для цілей організації контролю знань у навчальній системі // Сб. тр. Междунар. конф. “Интеллектуальный анализ информации-2006”. – К.: Просвіта, 2006. – С. 298–307.
15. *Титенко С.В., Гагарін О.О.* Практична реалізація технології автоматизації тестування на основі понятійно-тезисної моделі // Образование и виртуальность – 2006: Сб. науч. тр. 10-й Междунар. конф. Украинской ассоциации дистанционного образования / Под общ. ред. В.А. Гребенюка, Д.Р. Киншука, В.В. Семенца. – Харьков–Ялта: УАДО, 2006. – С. 401–412.
16. *Michele B. Medved.* Creating an Environment for Ongoing Learning // Learning Circuits - ASTD's Online Magazine Covering E-Learning, 2003. <http://www.learningcircuits.org/2003/dec2003/elearn.html>
17. *Романова Е.С.* 99 популярных профессий. Психологический анализ и профессиограммы. 2-е изд. – СПб.: Питер, 2004. – 464 с.
18. *Морозова Т.Ю., Деордиця Ю.С.* До проблеми взаємодії ІТ-освіти та ІТ-індустрії // Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій в науці, освіті та економіці: Матер. Всеукраїнської наук.-практ. конф., 11–13 грудня 2006 р., м. Луганськ. – Луганськ: Альма-матер, 2006. – С. 64–66.
19. *Воробьёв А.В.* Модель преодоления интервала междолжностных компетенций // Educational Technology & Society. – 2006. – 9(4).
20. *FreshKnowledge sCMS* – семантична система управління контентом <http://www.freshknowledge.net>
21. *Портал знань* – застосування комплексної моделі Web-системи безперервного навчання <http://www.znannya.org>
22. *Лабораторія СЕТ* – Віртуальна лабораторія новітніх інформаційних технологій. Дослідження в області дистанційного навчання. <http://www.setlab.net>
23. *Програмний продукт EduManager* демонстрація автоматизованої побудови тестів на основі понятійно-тезисної моделі. <http://www.setlab.net/ctm/>
24. *Елизаренко Г.Н.* Проектирование компьютерных курсов обучения: концепция, язык, структура. – К.: НТУУ “КПИ”, 2001.
25. *Stankov S., Žitko B. and Grubišić A.* Ontology as a Foundation for Knowledge Evaluation in Intelligent E-learning Systems. AIED'05 Workshop SW-EL'05: Applications of Semantic Web Technologies for E-Learning // Papers of 12th International Conference on Artificial Intelligence in Education (AIED 2005). – Amsterdam, 2005. <http://hcs.science.uva.nl/AIED2005/W3proc.pdf>

Рекомендована Радою
теплоенергетичного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
19 червня 2008 року

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.762.5:548.5

Г.П. Кисла, Ю.І. Богомол,
О.П. Карасєвська, І.Ю. Криклива

ВПЛИВ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ І ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРНУ ДОСКОНА- ЛІСТЬ МОНОКРИСТАЛІВ LaB_6

Вступ

Монокристали гексабориду лантану є основним матеріалом термокатодів електронно-променевих установок для плавлення, наплення, зварювання металів і сплавів [1–3].

Строк служби та стабільність струму емісії катодів залежать насамперед від однорідності хімічного складу та досконалості мікроструктури. Наявність таких дефектів, як пори, збільшує швидкість випаровування та руйнування в процесі іонного бомбардування. З іншого боку, при використанні в іонних системах катодів із гексабориду лантану доставка плазмоутворюючого газу може здійснюватися через тіло катода, тобто доцільним є формування монокристалів з порами, або пористих монокристалів.

На досконалість структури монокристалів LaB_6 , які отримуються в процесі безтигельної зонної плавки, впливають різні технологічні фактори: хімічний склад порошку, розмір частинок порошку, пористість заготовки, тиск захисного газу, температура розплаву, швидкість переміщення фронту кристалізації та ін.

У процесі зонної плавки пори можуть утворюватися внаслідок переходу з вихідної заготовки в розплав і захоплення фронтом кристалізації, а також у зв'язку з домішками в розплаві, що мають високу пружність пари. Кількість пор, що досягають фронту кристалізації, може змінюватися у процесі інтенсивного переміщення розплаву обертанням вихідної заготовки чи кристала або накладанням механічних звукових коливань на розплав під час вирощування. На сьогодні немає даних щодо ефективності застосування ультразвукових коливань для керування процесами видалення газозаповнених включень із зони розплаву під час вирощування монокристалів тугоплавких сполук. Відмінність процесу вирощування бінарних тугоплавких сполук від однокомпонентних розплавів металів полягає в тому, що на фронті кристалізації може накопичуватись один із компонентів. Ультразвукові коливання в такому випадку будуть впливати не тільки на ви-

далення пор, а й змінюватимуть концентраційне поле розподілення надлишкового компонента поблизу фронту кристалізації і, відповідно, змінюватимуть хімічну досконалість кристала.

Постановка задачі

Метою статті є вивчення процесів формування мікроструктури монокристалів гексабориду лантану під час зонної плавки порошкових пористих заготовок з накладанням ультразвукових механічних коливань та наступної термічної обробки.

Методика експерименту

У статті виконано дослідження процесу синтезу монокристалів гексабориду лантану з порошків марки "Ч" Донецького заводу хімічних реактивів (ДЗХР), які поставляються із сумарною за масою кількістю домішок близько 2 %.

Монокристали гексабориду лантану отримували методом безтигельної зонної плавки [3]. Для плавлення пресували циліндричні зразки діаметром 10 мм, довжиною 145 мм із порошків дисперсністю менше 40 мкм. Зразки мали пористість близько 40 %.

Зразки переплавляли при швидкості переміщення зони розплаву 3,5 мм/хв у середовищі захисного газу гелію під дією ультразвукових коливань. Пружні ультразвукові коливання збуджувалися в монокристалній затравці гексабориду лантану (довжина 10 мм) з допомогою джерела, яке закріплювалося до затравки на верхньому штоку установки затискачем. Тому УЗК відповідно до частоти і амплітуди джерела збуджувалися і поширювалися вздовж кристала, через зону розплаву і вихідну заготовку. Після кристалізації половина довжини монокристалів відпалювалась повторним нагріванням при температурах 2450–2500 °С. В результаті для дослідження структури і властивостей гексабориду лантану брали невідпалені і відпалені монокристали.

Після вирощування монокристали розрізались у поперечному і поздовжньому напрямках, готувались шліфи, досліджувалися структура на оптичному мікроскопі "Neophot-21", хімічний склад – за допомогою Оже-спектрального аналізу, досконалість кристалічної структури – за допомогою рентгенівського аналізу, при цьому записувалися дифрактограми на ДРОН-3М (CuK α -випромінювання, графітовий монокристал). Температура початку плавлення

визначалась оптичним пірометром з точністю $\pm 50^\circ\text{C}$, а електропровідність вимірювалась чотиризондовим методом.

Результати експериментів і їх обговорення

Найбільшим макродефектом у монокристалах гексабориду лантану, які вирощуються методом безтигельної зонної плавки, є пори. При швидкості кристалізації 3,5 мм/хв утворюються пори майже сферичної форми діаметром 1–2 мм. Величина і кількість їх зростає від початку до кінця росту кристала (рис. 1).

Визначення пористості кристалів методом гідростатичного зважування також показало, що їх пористість зростає в міру віддалення від початку росту кристала.

Пори утворюються в результаті як випаровування домішок, так і переходу пор, заповнених захисним газом гелієм, у розплав і монокристал [4]. Оскільки пористість спресованої заготовки по довжині є приблизно однаковою, то збільшення пористості по довжині монокристала можна пояснити лише переміщенням домішок, що випаровуються, у напрямку переміщення фронту кристалізації. Кількість домішок збільшується в міру зростання частки перекристалізованої заготовки. Такими домішками в порошку гексабориду лантану є сполуки кальцію, магнію з бором і вуглецем, що, як відомо, мають високу пружність пари при температурах плавлення.

Наявність домішок кальцію і вуглецю в кристалах підтверджуються Оже-спектральним аналізом (рис. 2).

Як видно з рис. 2, атоми кисню і азоту є адсорбованими та хемосорбованими на поверхні, оскільки після сорокахвилинного витравлювання іонами аргону інтенсивність їх піків зменшується.

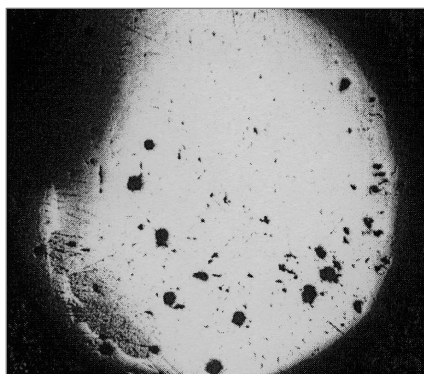
Ефективним методом видалення пор із розплаву є його обробка ультразвуком, оскільки під його дією газ, що міститься в порах, піддається стисненню і розширенню. Ультразвукові коливання спричиняють збільшення рухливості пор, їх переміщення і витіснення з розплаву, починаючи з фронту плавлення.

Після кристалізації в умовах обробки УЗК кальцій на Оже-спектрах не виявляється, тобто УЗК сприяють його видаленню. Кисень після обробки УЗК зникає вже після розпилення іонами аргону протягом 40 хв, що свідчить про його відсутність в об'ємі монокристала (рис. 3).

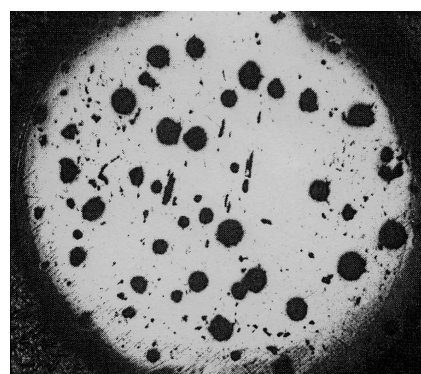
Оскільки властивості монокристалів, отриманих навіть з однієї партії вихідного порошку, частково відрізняються, то ступінь впливу відпалу визначали в процесі кристалізації одного і того ж кристала при обробці лише другої половини його довжини.

Зміна властивостей монокристалів по довжині в напрямку переміщення фронту кристалізації наведена на рис. 4. Пористість монокристалів збільшується практично лінійно при збільшенні частки перекристалізованого матеріалу з 1,26 до 3,36 % для оброблених і з 2,3 до 7,5 % для необроблених ультразвуком монокристалів (рис. 4, криві 1, 2), що зумовлено, як вказано вище, домішками, що мають високу пружність пари. Під дією пружних коливань щільність монокристалів є більшою за рахунок інтенсифікації видалення пор із розплаву (рис. 4, крива 1).

Після відпалування повторним нагріванням монокристала при високих температурах пористість збільшується стрибкоподібно. Причиною такої зміни пористості в процесі відпалування є збільшення об'єму пор, а відповідно, і об'єму зразків під дією стиснутого в порах захисного газу гелію в процесі кристалізації розплаву.



a



б

Рис. 1. Структура поперечного перетину монокристала LaB_6 на відстані від початку кристалізації 44 мм (а) і 140 мм (б)

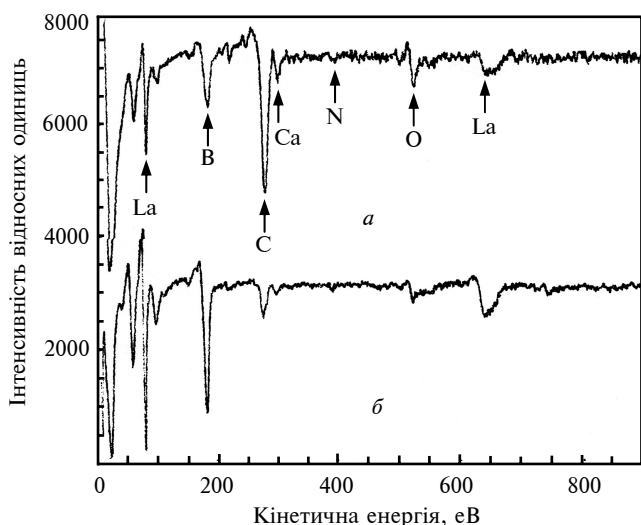


Рис. 2. Оже-спектрограми поверхні пористого монокристала гексабориду лантану, кристалізованого без обробки УЗК, після витравлювання іонами аргону поверхневого шару протягом 20 хв (а) і 40 хв (б)

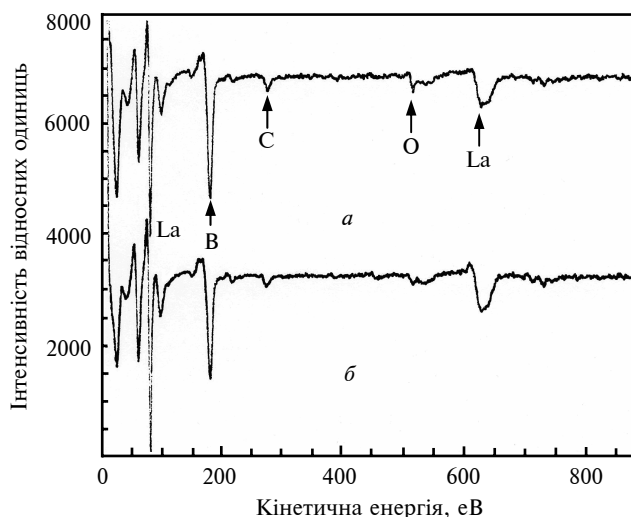


Рис. 3. Оже-спектрограми поверхні монокристала гексабориду лантану, закристалізованого в умовах обробки УЗК розплаву, після витравлювання іонами аргону протягом 20 хв (а) і 40 хв (б)

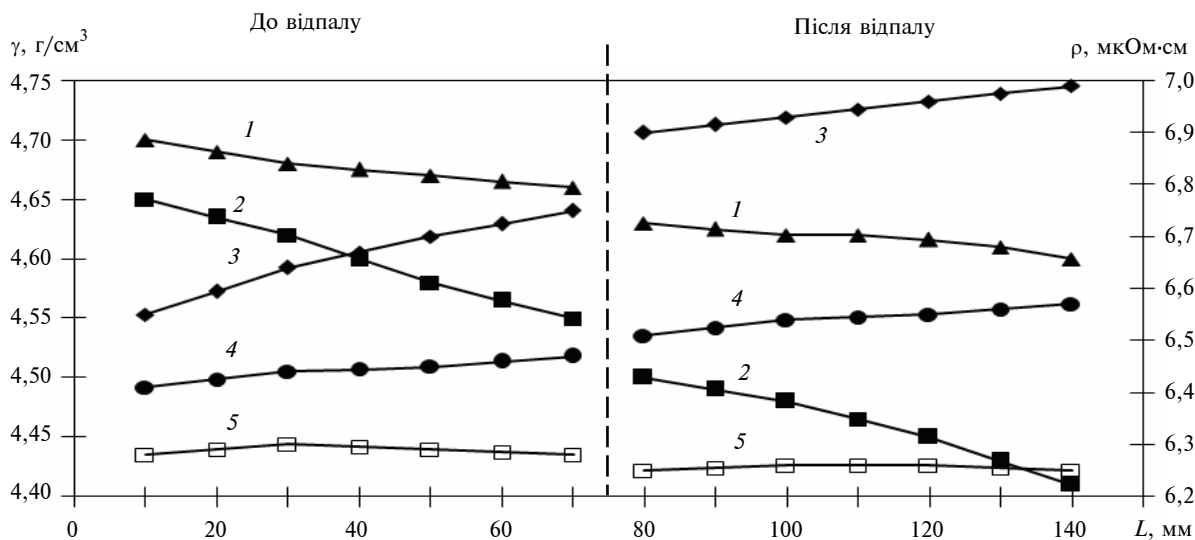


Рис. 4. Зміна щільності (1, 2) і питомого електроопору (3, 4, 5) по довжині монокристалів гексабориду лантану, вирощених при швидкості переміщення фронту кристалізації 3,5 мм/хв і оброблених ультразвуком (1, 4)

Питомий електроопір пористого зразка (рис. 4, криві 3, 4) при відпалі також стрибкоподібно збільшується і продовжує збільшуватися по довжині зразка. Проте він залишається практично незмінним по довжині зразків, оброблених і не оброблених УЗК (рис. 4, крива 5), рівним 6,28 мкОм·см і у відпалених зразків – 6,25 мкОм·см, якщо його перерахувати на безпористий стан (ρ_0) за рівнянням В.М. Оделевського для тіл з ізольованими порами [5]:

$$\rho_0 = \rho_n [1 - 3\Pi / (2 + \Pi)],$$

де ρ_n – питомий опір пористого зразка; Π – пористість.

Оскільки питомий електроопір, перерахований на безпористий стан, по довжині зразка практично не змінюється, то, безперечно, зміна електрофізичних властивостей монокристалів визначається переважно порами. Нижче значення питомого електроопору, перерахованого на безпористий стан у відпаленого

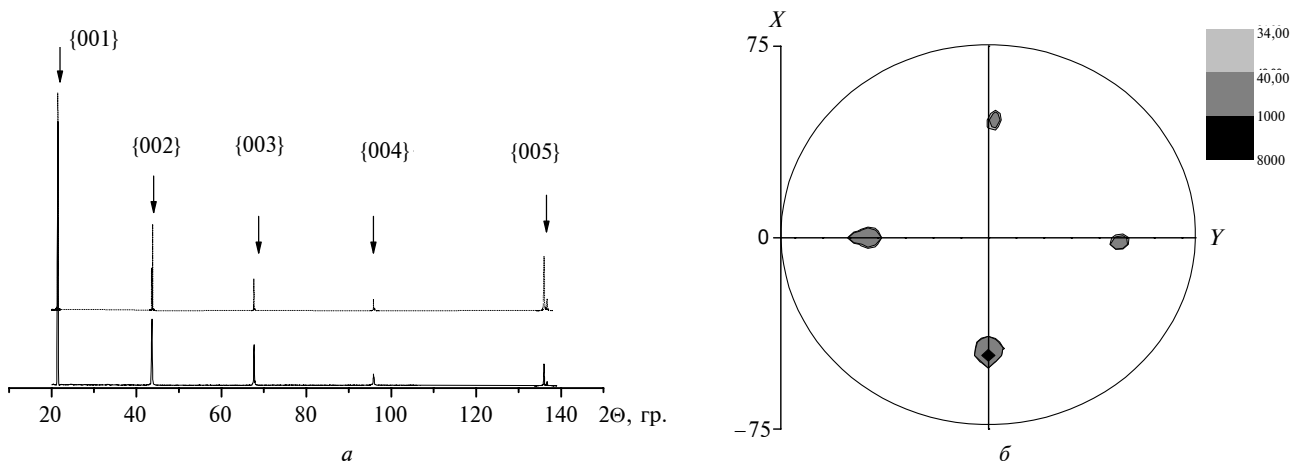


Рис. 5. $\langle\langle \Theta - 2\Theta \rangle\rangle$ рентгенограми LaB_6 (а) після кристалізації (—) і відпалу (—) і полюсна фігура (110) монокристала (б)

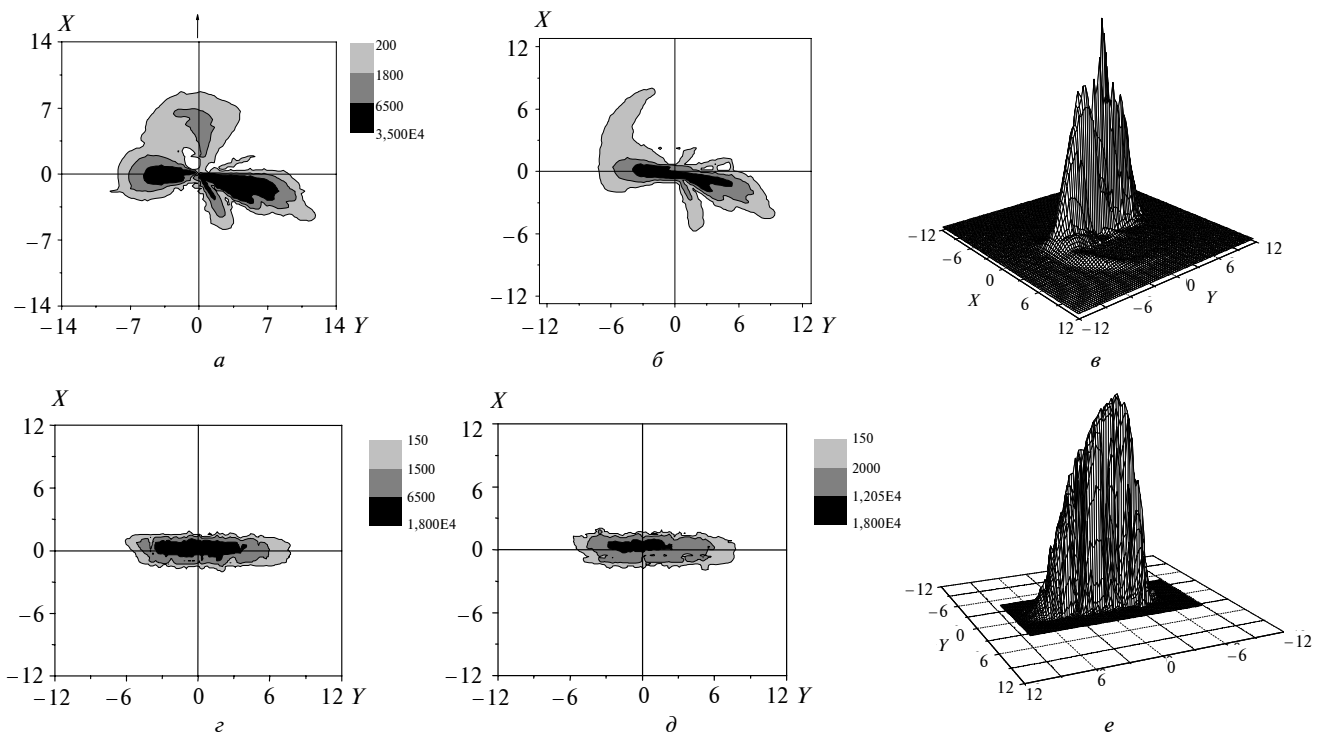


Рис. 6. Ізоінтенсивний (а, б, з, д) і тривимірний (е, е) розподіл інтенсивностей у площині, перпендикулярній дифракційному вектору (\mathbf{Iq}_\perp), після кристалізації (а, б, е) і відпалу (з, д, е). (Різні відрізки (а, б) і (з, д) по довжині зразка)

монокристала, вказує на те, що відпал покращує його тонку кристалічну структуру.

Рентгеноструктурний аналіз показує, що у відпалених зразках монокристалів параметр ґратки LaB_6 не змінюється, а ширина ліній змінюється мало (рис. 5).

У процесі відпалу структура кристала LaB_6 (лінійні дефекти, вакансії) стає більш досконалою, як це впливає з розподілу інтенсивностей вздовж дифракційного вектора (\mathbf{Iq}_\parallel) і роз-

поділу інтенсивностей у площині, перпендикулярній дифракційному вектору (\mathbf{Iq}_\perp), як показано на рис. 6, де розподіл інтенсивностей наведено на різних відрізках (а, б) і (з, д) по довжині зразка.

Відмінності розподілу в площині, перпендикулярній дифракційному вектору, для невідпалених і відпалених зразків можуть бути як у формі, так і в напрямках розширення. У відпалених монокристалах форма відображення

наближена до гауссовської кривої як у напрямку максимального розмиття, так і в зворотному напрямку. Для відпаленого зразка в напрямку максимального розмиття розширення майже на порядок більше, ніж у напрямку мінімального розширення. Для невідпаленого зразка форма розподілення в площині, перпендикулярній дифракційному вектору, є багатопіковою, що відповідає формуванню відносно крупних фрагментів, які мають всередині неоднорідний розподіл дефектів за рахунок дислокацій і груп вакансій.

Головною причиною утворення дефектів кристала (дислокації і вакансії) є те, що в процесі росту кристали формуються в нерівноважних умовах. Металеві атоми і атоми бору, які мають різні розміри і масу, переміщуються в розплаві в напрямку фронту кристалізації з різною швидкістю, що приводить до формування кристалів з точковими дефектами в підгратках металу і бору. В процесі високотемпературного відпалу повторним нагріванням при високих температурах структура кристала стає більш досконалою, що підтверджується як рентгеноструктурними дослідженнями, так і зменшенням питомого опору пористого монокристала, якщо отримані значення опору перерахувати на безпористий стан.

Висновки

У процесі кристалізації монокристалів гексабориду лантану з технічного порошку в них утворюються пори сферичної форми, розмір яких збільшується в напрямку переміщення фронту кристалізації. Отже, пори утворюються не тільки в результаті захоплення розплавом захисного газу гелію пористої заготовки, а і парів сполук кальцію, магнію з бором і вуглецем, які мають високу пружність парів і переміщуються в напрямку фронту кристалізації.

Встановлено, що накладання ультразвукових механічних коливань на розплав під час кристалізації дає можливість інтенсифікувати процеси видалення газових включень і підвищити структурну досконалість вирощених монокристалів.

Показано, що головною причиною утворення дефектів кристалічної будови (дислокацій, вакансій) є нерівноважні умови кристалізації. В процесі високотемпературного відпалу структура монокристалів стає більш досконалою, що підтверджується даними рентгеноструктурного аналізу і зменшенням питомого електроопору.

Г.П. Кислая, Ю.И. Богомол, О.П. Карасевская,
И.Ю. Крикливая

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ И ТЕРМИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРНОЕ СОВЕРШЕН-
СТВО МОНОКРИСТАЛЛОВ LaB_6

Представлены результаты влияния ультразвуковой и термической обработки на структурное совершенство монокристаллов гексаборида лантана, полученного методом безтигельной зонной плавки. Показано, что в монокристаллах в результате испарения примесей образуются поры, количество которых уменьшается под воздействием УЗК. Степень дефектности структуры кристаллов уменьшается в процессе нагрева при предплавильных температурах.

G.P. Kysla, I.I. Bogomol, O.P. Karasevskaya,
I.Yu. Kryklyva

THE INFLUENCE OF ULTRASONIC AND HEAT
TREATMENT ON STRUCTURAL PERFECTION
OF LaB_6 MONOCRYSTALS

The research results of the influence of ultrasonic and heat treatment on structural perfection of LaB_6 monocrystals, which obtained by floating zone method. We show that the single crystals have some pores, formed as a result of admixtures evaporation. Furthermore, we determine that the pores' amount is decreased under the influence of ultrasonic vibrations. Moreover, we determine the defectiveness degree of crystals structure is diminished by the process of heating at near melting temperatures.

1. *Кудинцева Г.А., Мельников А.И., Морозов А.В., Никонов Б.П.* Получение спеченных катодов из чистого гексаборида лантана и изучение их эмиссионных свойств // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. – 1968. – 4, №1. – С. 49–53.
2. *Самсонов Г.В., Кондрашов А.И., Охремчук Л.Н., Подчерняева И.А.* Термоэмиссия сложных сплавов с участием гексаборида лантана // Порошковая металлургия. – 1977. – № 1. – С. 21–28.

3. *Лобода П.І.* Надтверді напрямлено армовані композиційні матеріали на основі тугоплавких сполук // *Металознавство та обробка металів.* – 1998. – № 1-2. – С. 76–81.
4. *Лобода П.І., Кислая Г.П., Карасевская О.П. и др.* Закономерности формирования структуры монокристаллов гексаборида лантана в процессе зонной плавки и последующего высокотемпературного отжига // *Theses and Reports of 5th international conference metals, welding & powder metallurgy MET-2007.* – September 13–14, 2007. – Jurmala, Latvia. – P. 95–97.
5. *Оделевский В.М.* Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем // *Журн. техн. физики.* – 1951. – **21**, № 6. – С. 678–685.

Рекомендована Радою
інженерно-фізичного факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
24 квітня 2008 року

УДК 539.216.2:661.685

О.П. Павлова

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ У ТОНКОПЛІВКОВИХ КОМПОЗИЦІЯХ ПЛІВКА Ta(100–540 нм)/МОНОКРИСТАЛ Si(001)**Вступ**

Плівки силіцидів перехідних металів широко використовуються як функціональні елементи в наведених і гігавеликих інтегральних схемах та мікроприладах, які виготовляються за кремнієвою технологією (тобто основою приладу є монокристална пластина кремнію). Особливу увагу привертають дисиліциди, які є кінцевим продуктом твердофазних реакцій метал–кремній, зокрема $TaSi_2$, що пояснюється їх привабливими електрофізичними властивостями і термостабільністю [1]. Дисиліцид $TaSi_2$ використовується для створення складних затворів (керуючих сіток) транзисторів. Під час виготовлення мікросхеми формування силіцидної плівки $TaSi_2$ як функціонального елемента відбувається за POLYCIDЕ-процесом в результаті співосадження металу і кремнію. До переваг POLYCIDЕ-процесу можна віднести гладку межу розділу силіцид/кремній, ніж та, що формується внаслідок твердофазної реакції, оскільки на утворення силіциду під час співосадження металу і кремнію зовсім не витрачається кремній підкладки. Дослідженню твердотільних реакцій в системі плівка Ta/монокристал Si присвячена значна кількість публікацій [2–10], в яких встановлені закономірності формування кристалічної структури плівки $TaSi_2$ через ряд проміжних фаз, досліджені кінетика і механізми твердотільних реакцій, морфологія поверхні і межа розділу силіцидна плівка $TaSi_2$ /підкладка Si. Але істотний вплив на механічні, електричні та магнітні властивості конденсованих плівок роблять внутрішні механічні напруження. Вивчення залежності величини і знака напружень від фізико-технологічних умов отримання може дати відомості про механізм виникнення і розвитку внутрішніх механічних напружень у плівках. Цим питанням було присвячено численні праці [11–16]. Вплив фізико-технологічних умов отримання плівок на величину механічних напружень, що виникають у них, їх розподіл можна подати як вплив темпе-

ратури підкладки під час осаження, швидкості конденсації, товщини осаженої плівки, температури і умов термічної обробки плівок. Проте накопичені до теперішнього часу відомості про величину і знак механічних напружень у плівках досить суперечливі. Немає й опису механізмів їх утворення.

Постановка задачі

Мета даної статті – вивчення впливу основних параметрів отримання силіцидної плівки в тонкоплівкових композиціях плівка Ta(100–540 нм)/монокристал Si(001) – температури підкладки під час конденсації, товщини осаженої плівки металу, а також режиму термообробки – на величину і знак механічних напружень та механізми їх виникнення у фазах силіцидів танталу.

Методика експерименту

Тонкоплівкові композиції плівка Ta(100–540 нм)/монокристал Si(001) одержано методами електронно-променевого осаження танталу і магнетронного розпорошування мішені танталу на монокристалічній підкладці кремнію орієнтації (001), які знаходились при температурі ($T_{\text{підкл}}$) 420, 670, 870 К. Зразки піддавалися відпалу: 1) у високому вакуумі (ВВ) не нижче 10^{-3} Па в інтервалі температур 570–1070 К протягом однієї години і при температурі 1270 К протягом 6 с; 2) імпульсному відпалу в аргоні в інтервалі температур 970–1170 К протягом 140–150 с. Для ідентифікації фаз використовувався рентгенографічний метод із фотографічною реєстрацією рентгенівської дифракції в камері Дебая, що дозволяло одержати інтегральну інформацію за товщиною плівки. Вивчення зміни напружень, що виникають у плівках у процесі відпалу, проводилося для зразків, отриманих на підкладках, підігрітих до 420, 670, 870 К. Механічні напруження в досліджуваних плівках було визначено за допомогою методу рентгенівської тензометрії, зокрема $\sin^2\psi$ -методом за дифракційною лінією (220) дисиліциду $TaSi_2$, а також лініями (600) і (340) проміжного силіциду $Ta_{4,5}Si$. Переваги рентгенівського методу перед механічним полягають у можливості вимірювання деформації в будь-якому кристалографічному напрямку, а також у можливості розділення напруги в кристалічній і аморфній складових плівки [10, 12].

Результати і їх обговорення

За результатами рентгенофазового аналізу, плівки танталу завтовшки від 100 до 540 нм, осаджені на монокристалічний кремній, перебувають у кристалічному стані і вже в процесі конденсації внаслідок взаємної дифузії атомів кремнію і танталу в поверхневих шарах плівкової композиції мають місце твердотільні реакції, які супроводжуються утворенням невеликої кількості проміжного, збагаченого на тантал, силіциду $Ta_{4,5}Si$. Наступний відпал тонкоплівкової композиції $Ta(100-540 \text{ нм})/Si(001)$ супроводжується подальшим розвитком термічно активованих твердотільних реакцій з утворенням силіцидних фаз танталу: Ta_5Si_3 і $TaSi_2$ (таблиця). Цей процес можна зобразити такою схемою: $Ta(100-540 \text{ нм})/Si(001) \rightarrow Ta + Ta_{4,5}Si \rightarrow Ta_5Si_3 \rightarrow TaSi_2$.

Таблиця. Результати дослідження механічних напружень у плівковій композиції $Ta(100-540 \text{ нм})/Si(001)$, одержаної методом електронно-променевого осадження

Товщина осадженої плівки Ta, нм	Температура відпалу T_v , К	Температура підкладки $T_{\text{підкл}}$, К	Напруження σ_T , ГПа	Фазовий склад
300	390	420	1,8270	Ta + $Ta_{4,5}Si$
300	570	420	0,5680	
300	770	420	0,1113	
300	870	420	0,8020	
300	970	420	0,7076	
300	1070	420	0,2829	Ta_5Si_3 + $TaSi_2$
200	1070	420	0,9186	
100	1070	420	0,1720	
540	1070	420	0,6679	$TaSi_2$
300	870	670	0,2572	
300	1070	670	0,3004	
300	390	670	0,1407	
300	390	870	0,6480	
300	1070	870	0,8625	

Температура підкладки під час електронно-променевого осадження плівки танталу істотно впливає на процеси формування силіцидних плівок танталу, їх структурний стан, а також на величину і знак макронапружень (рис. 1, таблиця). Внутрішні напруження у плівках танталу завтовшки 300 нм є розтягувальними. Залежність механічних напружень від темпе-

ратури підкладки має дві області значень: перша при $T_{\text{підкл}} = 420-670 \text{ К}$; друга при $T_{\text{підкл}} = 670-870 \text{ К}$. У першій області значень температур підкладки напруження спочатку зменшуються, досягаючи мінімуму при температурі 670 К, а потім збільшуються.

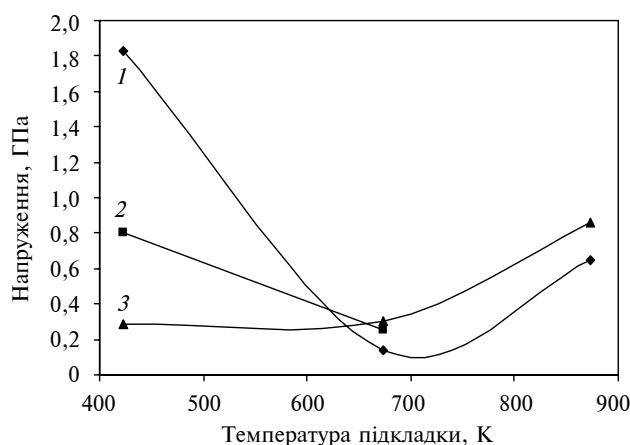


Рис. 1. Залежність механічних напружень у тонкоплівковій композиції $Ta(100-540 \text{ нм})/Si(001)$ від температури підкладки після осадження (крива 1) і відпалів при температурах 870 К (крива 2) і 1070 К (крива 3)

Дана залежність, ймовірно, зумовлена різними механізмами виникнення механічних напружень, характерними для кожної області значень $T_{\text{підкл}}$.

Вплив товщини плівки на напружений стан був досліджений на зразках, осаджених при $T_{\text{підкл}} = 420 \text{ К}$ і відпалених за температури 1070 К, протягом однієї години (рис. 2).

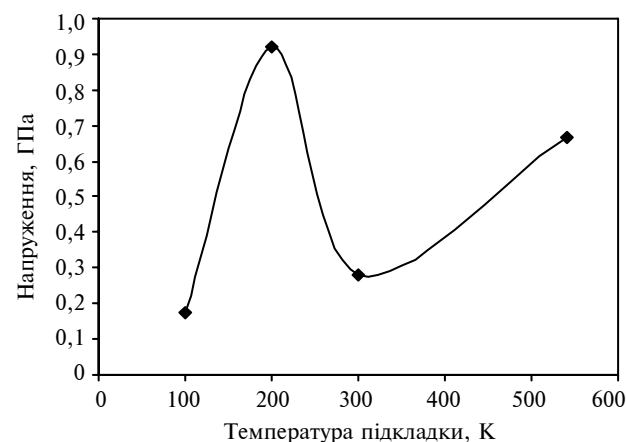


Рис. 2. Залежність механічних напружень в тонкоплівковій композиції $Ta(100-540 \text{ нм})/Si(001)$ від товщини осадженої плівки Ta

Для плівок танталу, товщина яких була більшою за 200 нм, спостерігається зростання

розтягувальних механічних напружень. Збільшення товщини осадженої плівки до 300 нм веде спочатку до зменшення, а потім, в інтервалі товщин 300–540 нм, до зростання механічних напружень.

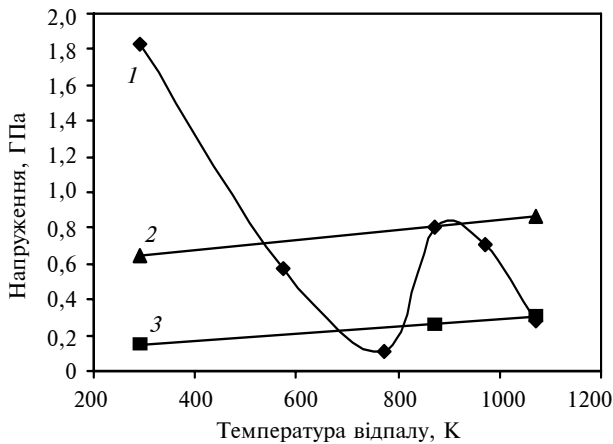


Рис. 3. Залежність механічних напружень від температури відпалу тонкоплівкової композиції Ta(100–540 нм)/Si(001), одержаної на підкладках, підігрітих до температур 420 К (крива 1), 670 К (крива 2) і 870 К (крива 3)

Температура відпалу також істотно впливає на рівень механічних напружень у плівках. Як видно на рис. 3, криві 2 і 3 є лінійними залежностями величини механічних напружень від температури відпалу, що мають тенденцію до зростання під час збільшення температури у всьому інтервалі. Залежність, зображена кривою 1, має складнішу форму. За допомогою рентгеноструктурного аналізу встановлено, що в плівках, одержаних методом магнетронного розпорошування мішені, після осадження залишається силіцид $Ta_{4,5}Si$, текстурований у напрямку [001], паралельному поверхні підкладки. Визначення внутрішніх механічних напружень у фазі $Ta_{4,5}Si$, проведене по дифракційних лініях (600) і (340), показало наявність стискаючих напружень. Величина пружної деформації становила близько 1,5 %.

Відомо, що полікристалічні плівки характеризуються субструктурною нерівноважністю, зумовленою дислокаціями, дефектами упаковки, вакансіями, мікропорами, введеними атомами домішок і залишкових газів, аморфізованими ділянками та іншими дефектами кристалічної ґратки [10, 12]. В разі, якщо внесок дислокацій у зміну питомого об'єму малий або ж повністю його нема, то концентрація надмірних вакансій робить сильний вплив на питомий об'єм. Зменшення об'єму конденсату мо-

же відбуватися за рахунок виходу або стоку вакансій на зовнішню чи внутрішню поверхні, процесу закриття і спікання мікропор. Вакансії можуть стікати до дислокацій, щільність яких велика, особливо в плівках, одержаних за низьких температур підкладки. Із збільшенням $T_{\text{підкл}}$ інтенсивність цього процесу зростає. Процеси подальшого охолодження і зберігання супроводжуються перебігом процесів заліку таких недосконалостей (субструктурне старіння). В результаті, у плівці виникають залишкові механічні напруження структурного характеру.

Крім розглянутих вище структурних механізмів виникнення механічних напружень, в осаджених плівках танталу існує також і термічний механізм. Виникнення механічних напружень термічного характеру пов'язано з різними значеннями коефіцієнтів термічного розширення (КТР) плівки і підкладки. Розраховані напруження σ_T є розтягувальними, оскільки КТР плівки танталу і силіцидних фаз, що формуються, більше, ніж у підкладки кремнію (таблиця). Із зростанням температури підкладки термічні напруження збільшуються.

Таким чином, складний характер залежності механічних напружень у плівці танталу від температури підкладки (див. рис. 1) можна пояснити тим, що:

1) у першій області значень $T_{\text{підкл}}$ (менше температури 670 К) визначальну роль відіграє структурний механізм виникнення механічних напружень; із зростанням температури підкладки процеси “заліковування” структурної недосконалості перебігають швидше, а отже, й значення механічних напружень падають;

2) у другій області значень $T_{\text{підкл}}$ (більше температури 670 К) визначальну роль відіграють напруження термічного характеру, які із зростанням $T_{\text{підкл}}$ збільшуються, що викликає зростання значень механічних напружень в цілому.

Вплив товщини плівки на її напружений стан (рис. 2), можливо, викликаний виникненням аморфізованих ділянок і подальшим процесом їх кристалізації. Як відомо, цей механізм виникнення макронапружень найбільш поширений на початковому етапі формування конденсату. Таким чином, механічні напруження у плівці зростають із збільшенням її товщини до 200 нм. Під час зростання плівки слід враховувати також процеси структурної релаксації (процеси утворення більш довшої структури), які ведуть до зменшення механічних на-

пружень. У деяких публікаціях [10] було зафіксовано, що значні розтягувальні напруження різні за товщиною плівки: з боку підкладки вони значно менші. Така нерівномірність механічних напружень узгоджується з неоднорідністю субструктурних і міцнісних характеристик за товщиною плівки, пов'язаної із розвитком в конденсаті процесів "заліковування" структурної недосконалості під тепловою дією підкладки. Таким чином, подальше збільшення товщини осадженої плівки до 540 нм веде до поступового зростання механічних напружень, що свідчить про накопичення структурних дефектів.

Різний характер зміни механічних напружень в тонкоплівкових композиціях Ta(100–540 нм)/Si(001) залежно від температури відпалу можна пояснити тим, що в процесі формування конденсату адсорбція чужорідних атомів, їх розчинення із впровадженням в кристалічну ґратку і скупченням на міжкристалічних межах збільшує питомий об'єм конденсату. Цей процес породжує виникнення залишкових стискуючих напружень. Із зростанням температури відпалу дифузійна рухливість таких атомів зростає, що веде до перерозподілу домішкових атомів. Це викликає зменшення стискуючих напружень у плівці і веде до зростання загальних розтягувальних макронапружень (рис. 3, криві 2, 3). В разі складнішого характеру залежності величини механічних напружень від температури відпалу можна припустити одночасну дію, але різних за інтенсивністю перебігу механізмів виникнення механічних напружень (рис. 3, крива 1). За низьких температур підкладки ($T_{\text{підкл}} < 670$ К) переважає структурний механізм виникнення механічних напружень, і відпал в даному випадку веде до релаксації механічних напружень та зменшення їх вели-

чини. Зростання механічних напружень в інтервалі температур 770–1070 К відбувається внаслідок переходу спочатку фази Ta₅Si₃ з гексагональної в тетрагональну модифікацію і далі утворення кінцевого силіциду TaSi₂, що веде до зміни питомого об'єму. Дані припущення про вплив відпалу на величину механічних напружень знайшли підтвердження в публікації [14], де відпал плівок приводив до зменшення механічних напружень за умови осадження конденсату на підкладку за низьких температур.

Висновки

У плівках Ta завтовшки 100–540 нм, осаджених на монокристалічний кремній Si(001) електронно-променевим методом при температурах підкладки $T_{\text{підкл}} = 420, 670, 870$ К і відпалених в інтервалі температур 370–1070 К, протягом однієї години, відбувається перебіг процесів взаємодифузії атомів танталу і кремнію, які супроводжуються термічно активованими твердотільними реакціями з утворенням силіцидних фаз за схемою Ta(100–540 нм)/Si(001) → Ta + Ta_{4,5}Si → Ta₅Si₃ → TaSi₂. Інтенсивність розвитку процесів дифузійного фазоутворення залежить від температури підкладки і температури відпалу. Встановлено, що основні параметри отримання плівок – температура підкладки під час конденсації, товщина плівки і подальша термообробка істотно впливають на величину механічних напружень у тонкоплівковій композиції плівка Ta(100–540 нм)/монокристал Si(001). Подальша розробка фізико-технологічних параметрів процесів осадження і термічної обробки дозволить сформуванню стабільних плівкових композицій, збільшити їх температурно-часову стійкість та забезпечити відтворюваність їх структури і властивостей.

О.П. Павлова

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ КОМПОЗИЦИЯХ ПЛЕНКА Ta(100–540 нм)/МОНОКРИСТАЛЛ Si(001)

Изучено влияние основных параметров получения тонкопленочных композиций Ta(100–540 нм)/Si(001) – температуры подложки при осаждении пленки Ta, толщины осадженной пленки Ta, а также параметров их последующей термообра-

O.P. Pavlova

THE INVESTIGATION OF MECHANICAL STRESSES IN Ta(100–540 nm) FILM/Si(001) SINGLE CRYSTAL THIN FILM COMPOSITIONS

This paper studies the influence of basic parameters of production of Ta(100–540 nm)/Si(001) thin film compositions, such as substrate temperature during Ta film deposition, Ta film thickness and further thermal treatment parameters at temperature

ботки в интервалі температур 570–1070 К на величину і знак виникаючих механічних напружень. Описані можливі механізми виникнення напружень в досліджуваних пліноч-них композиціях.

range of 570–1070 K on the magnitude and sign of mechanical stresses. Moreover, the possible mechanisms of stresses emergence in the thin film compositions are highlighted.

1. *Colgan E.G., Cambino J.P., Hong Q.Z.* Formation and stability of silicides on polycrystalline silicon // *Materials Science and Engineering*. – 1996. – **R16**. – P. 43–96.
2. *Sinha A.K.* Metalization technology for very-large-scale integration circuits // *Thin Solid Films*. – 1982. – **90**. – P. 271–285.
3. *Tien D., Ottaviani G., Tu K.N.* Kinetics of crystallization Ta-Si // *J. Appl. Phys.* – 1983. – **54**, N 12. – P. 7056–7062.
4. *Neplf F., Fischer E., Schwabe U.* A Ta-Si barrier for low resistivity and high reliability of contacts to shallow diffusion regions in silicon // *Thin Solid Films*. – 1984. – **20**. – P. 257–266.
5. *Daneshvar K.* The rapid isothermal annealing of tantalum silicide // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. – 1985. – **B.10/11**. – P. 529–531.
6. *Wileen Chu, Alokesh P., Bhandia B.* Effects of deposition parameters on the growth of thermal oxide on silicides over single crystal silicon // *J. Vac. Sci. Technol.* – 1984. – **B.2**, N 4. – P. 707–709.
7. *Natan M.* Structure and properties of rapidly thermal annealed Ta/Si multilayers // *Ibid.* – 1985. – **B.3**, N 6. – P. 1707–1714.
8. *Maa J.-S., Magee C.W., O'Neill J.J.* Phosphorus out diffusion from double-layers tantalum silicide polycrystalline silicon structure // *J. Vac. Sci. B.* – 1983. – **1**, N 1. – P. 1–5.
9. *Makogon Yu.N., Maximovich L.P., Sidorenko S.I.* Phase formation processes and electrical properties of tantalum-silicon thin films // *Met. Phys. Adv. Tech.* – 1996. – **15**. – P. 969–973.
10. *Палатник Л.С., Фукс М.Я., Косевич В.М.* Механізм утворення і субструктура конденсованих плінок. – М.: Наука. – 1972. – С. 24–30.
11. *Павилайнен В.С., Леонова Н.Н., Белугин А.Г.* Напружене стані конденсованих плінок алюмінія, палладія і ванадія // *Фізика і хімія обробки матеріалів*. – 1975. – № 4. – С. 54–57.
12. *Романов А.С., Щеглова В.В.* Полупровідникові прилади. Сер. 2. Вып. 6(798). Механічні напруження в тонких плівках // *Реферативно-аналітичний збірник*. – М.: ЦНИИ “Електроніка”, 1981. – 68 с.
13. *Фирстова И.С., Сидоренко С.И., Макогон Ю.Н.* Трещиностойкость поверхностных слоев кремния с покрытиями // *Физическое материаловедение, структура и свойства материалов*. Сер. 1. – 1999. – С. 172–178.
14. *d’Heurle F.M., Thomas O.* Stress during of silicides formation // *Diffusion Forum*. – 1996. – **5**, N 129–130. – P. 137–150.
15. *Zang S.-L.* Stress in silicides thin films obtained by solid state reaction // *Silicides, Fundamentals and Application*. – 1999. – P. 303–314.
16. *Nur O., Willander M., Radamson H.H. et al.* Strain characterization of CoSi₂/Si/Ge heterostructures // *Appl. Phys. Lett.* – 1994. – **64**, N 4. – P. 440–443.

Рекомендована Радою
інженерно-фізичного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
24 червня 2008 року

УДК 621.762.3

С.О. Руденький

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ОБРОБКИ НА ПРОЦЕС ДИСПЕРГУВАННЯ ОКСИДУ АЛЮМІНІЮ І ЙОГО ВЛАСТИВОСТІ, ОДЕРЖАНОГО КРІОХІМІЧНИМ МЕТОДОМ

Вступ

Підвищена якість керамічних матеріалів на основі ультрадисперсних порошків, які мають необхідний ступінь однорідності хімічного, гранулометричного і фазового складу, забезпечується кріохімічною технологією із застосуванням низько- і високотемпературного впливу. Однак, незважаючи на те, що таким способом можна отримувати оксидні системи з питомою поверхнею 100 м²/г і більше, для прецизійної керамічної технології вони малопридатні. За своєю природою такі порошки схильні до агломерації і схоплюються в достатньо міцні агломерати частинок з широким розподілом за розмірами [1]. Тому при виготовленні виробів з них традиційними методами порошкової металургії неможливо одержати однорідну структуру і необхідну щільність матеріалу пресовки, а це призводить на наступній технологічній стадії – спіканні – до утворення локальних зон із різною щільністю внаслідок неоднорідності поля капілярних сил, що відповідають за ущільнення [2, 3]. Для подолання названих небажаних явищ і досягнення однорідної структури кінцевого виробу необхідно робити підготовку вихідного порошку, яка здійснюється за такими технологічними операціями: відновне відпалювання, розмелювання, розсівання на фракції, просіювання з метою видалення домішок і грудочок, сушіння або прожарювання. Важливою операцією є розмелювання. Але одним з ефективних методів диспергування порошків, в тому числі і схильних до агломерації, є ультразвукова обробка (УЗО), яка збільшує питому поверхню порошків у кілька разів [4]. Це свідчить про інтенсивне подрібнення як агломератів, так і самих частинок такого порошку. Тому значний інтерес може становити застосування УЗО для подрібнення агломератів ультрадисперсних кріохімічних (УДКХ) порошків оксидів, які мають високу схильність до таких утворень. А в результаті отриманий на їх основі

матеріал повинен мати більш однорідну структуру.

Постановка задачі

У даній статті розглядаються структурні зміни вихідної речовини при термообробці і досліджується можливість використання ультразвукової обробки для диспергування порошків оксиду алюмінію, одержаних як за кріохімічною технологією, так і за традиційним методом. Отже, мета статті полягає у вивченні впливу ряду чинників УЗО на питому поверхню і розмір частинок порошку оксиду алюмінію, отриманного за кріохімічною технологією, при подрібненні агломератів такого порошку та проведення порівняльного дослідження диспергування в аналогічних умовах оксиду алюмінію, отриманого за традиційною технологією.

Методика досліджень

За об'єкт дослідження взято УДКХ порошки оксиду алюмінію, які отримані за технологічною схемою (рис. 1) і хімічним складом (таблиця).

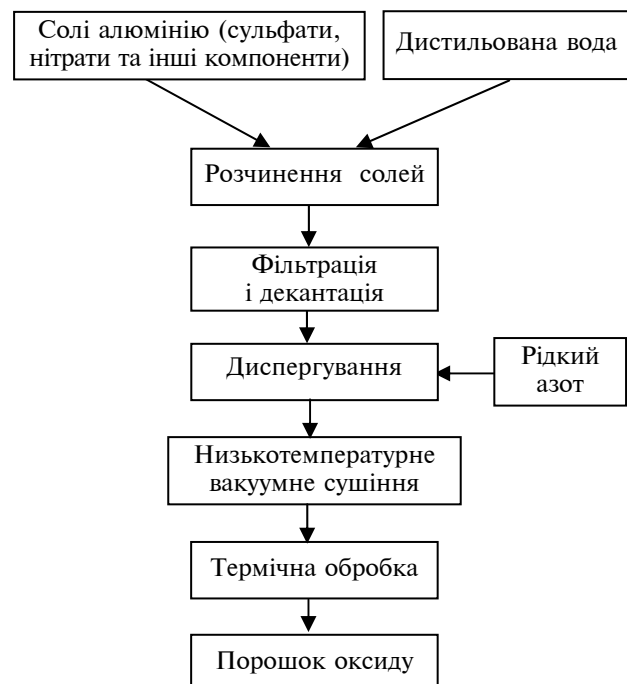


Рис. 1. Технологічна схема отримання кріохімічного порошку оксиду алюмінію

При цьому рентгенофазовий аналіз проводився в монохроматичному випромінюванні

Cu-K $_{\alpha}$ на ДРОН-3,0, а електронна мікроскопія – на РЕМ-200. Ультразвукова обробка порошку здійснювалась на установці УЗДН-А фірми SELMA у різних середовищах: дистильованій воді, ацетоні та ізопропіловому спирті протягом 75 хв. Для попередження агломерації в кожен з рідин добавлялась невелика кількість (до 1 % за масою) поверхнево-активної речовини (ПАР). Після УЗД отримана суспензія сушилась у сушильній шафі. Висушений порошок кілька разів розтирався в ступці. Питома поверхня отриманих порошоків за методом низькотемпературної адсорбції азоту вимірювався на чеській установці “МРР-2”. Питома поверхня визначалась з точністю до 0,01 м²/г. За результатами вимірювання питомої поверхні розраховувався середній розмір частинок за формулою

$$d_{\text{сер}} = \frac{60000}{\gamma S_{\text{п}}},$$

де γ – щільність оксиду алюмінію, г/см³; $S_{\text{п}}$ – його питома поверхня, см²/г.

Експериментальна частина

Фазовий склад і питома поверхня зразків Al₂O₃, отриманого кріохімічним методом, значною мірою залежать від режиму розкладу вихідної сировини – Al₂(SO₄)₃ (див. таблицю). При температурі випалу нижче 1000 °С повний розклад сульфату алюмінію не відбувається. Рентгеноструктурні дослідження показали, що першою фазою, яка утворюється після розкладу, є γ -Al₂O₃. Частково порошок перебуває в рентгеноаморфному стані, оскільки розмір кристалітів, як правило, менший 300 Å. Такі дрібні кристаліти дають широкі піки при рентгеновській дифракції (рис. 2, а), тому піки низької інтенсивності, по яких можна відрізнити γ -фазу від подібних, таких, як δ -Al₂O₃, не визначені. Ця фаза існує до температур 1000–1100 °С, при яких починає утворюватись α -Al₂O₃ і відбувається значне зниження площі поверхні

порошку, а отже, зростають розміри кристалітів. При температурі прожарювання 1200 °С порошок γ -Al₂O₃ повністю переходить в α -Al₂O₃ (рис. 2, б). Візуально це проявляється у зменшенні об'єму порошку приблизно на 15 %.

За даними растрової мікроскопії (рис. 3) агломерати УДКХ порошоків мають складну розгалужену структуру і високу пористість. Вся їх внутрішня частина пронизана каналами. У великій кількості виявлено пластинчасті, кулькоподібні утворення і хаотично розмішені дрібні частинки. Всі фрагменти структури гранул не мають правильної кристалічної форми.

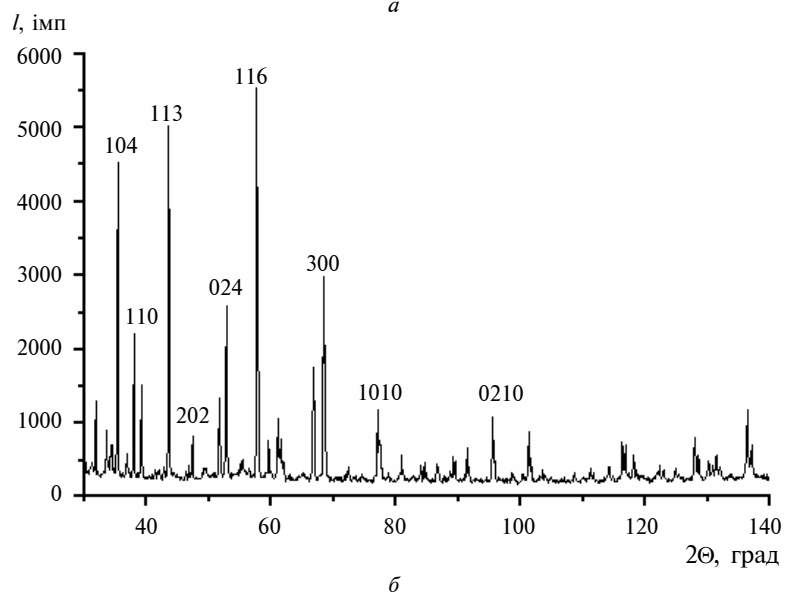
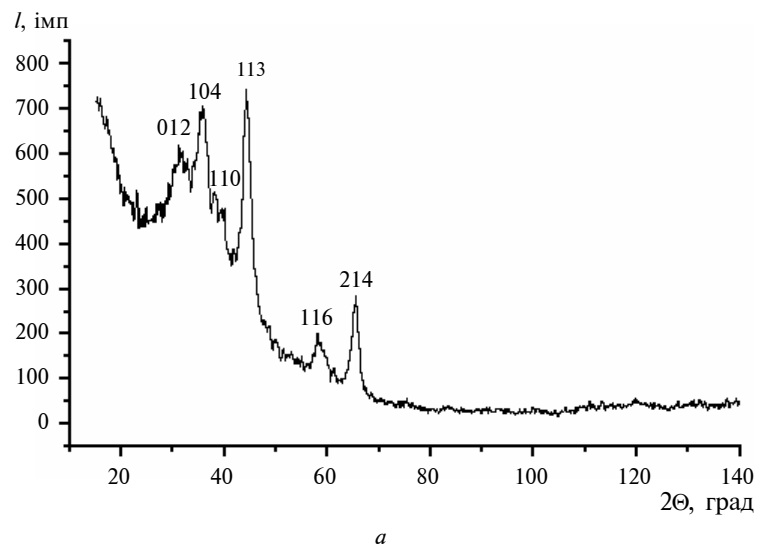
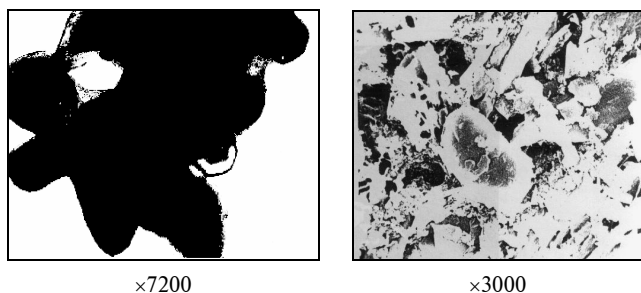


Рис. 2. Картина дифракції рентгеновських променів для порошоків α - і γ -Al₂O₃ (а) і α -Al₂O₃ (б), які прожарювались при температурах: а – 1000 °С; б – 1200 °С

Рис. 3. Структура частинок порошків α - Al_2O_3

Наявність мікропористості у вигляді каналів ймовірно пов'язана з природою кристалізації розчину і свідчить про те, що заморожування гранул відбувається не миттєво і має кінцеву швидкість, що добре погоджується з даними [2]. У процесі сублімації і випалу видаляються вода і сполуки сірки, тому при активному газовиділенні можливе утворення дрібних нагромаджень частинок, оскільки фрагменти структури гранул руйнуються.

Вивчення фазового переходу γ - Al_2O_3 в α - Al_2O_3 при різних температурах і часі витримки проводилось за допомогою рентгенографії. Початок переходу спостерігався при 1000°C і витримці більше 60 хв. Результати вимірювання питомої поверхні за рахунок азотної адсорбції (див. таблицю) свідчать про те, що при 1000°C і вище визначальним фактором фазових переходів також стає і час витримки.

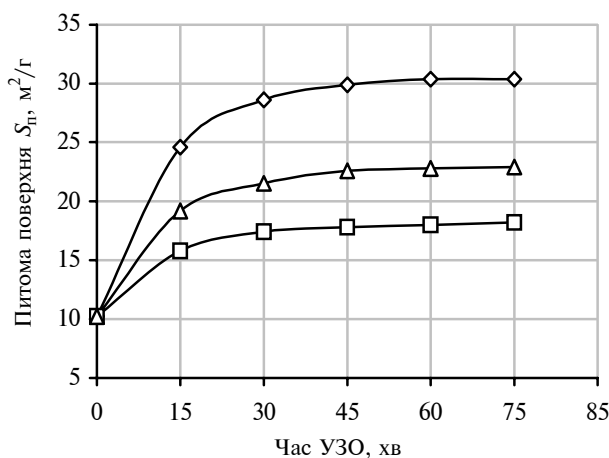
Дослідження порошків α - Al_2O_3 і їх розміру при допомозі мікроскопії дало можливість встановити, що частинки α -оксиду алюмінію являють собою практично правильні монокристали α - Al_2O_3 , з'єднані тонкими перетинками (рис. 3). Така структура є міцною і не відновлюється до вихідних монокристалів. Розподіл порошку за розмірами показано на рис. 4.

Рис. 4. Розподіл криохімічного α - Al_2O_3 порошку за розмірами

Ланцюговість кристалів α - Al_2O_3 , очевидно, пов'язана з технологією отримання порошків. Найбільш реально можна припустити, що це зумовлено малою енергією активації. Зображення кристалів у темному полі свідчить про ріст монокристалів в одній площині, що пов'язано з відсутністю розорієнтації α -частинки до обох γ -частинок, а це можливо тільки на стику.

Проведення більш глибоких досліджень не виявили численних напрямків росту частинок α - Al_2O_3 , переважає один вектор, який можна пояснити структурою вихідних гранул – наявністю каналної пористості.

Ультразвукова обробка порошку оксиду алюмінію, отриманого криохімічним методом, показала, що найбільший ступінь диспергування був досягнутий у середовищі дистильованої води (питома поверхня S_p збільшилася в 2–2,5 рази) протягом 1 год (рис. 5). При подальшому збільшенні часу УЗД проявляється тенденція до значного зниження інтенсивності подрібнення порошку. Питома поверхня його після цього практично не змінюється.

Рис. 5. Зміна питомої поверхні агломератів УДКХ порошку Al_2O_3 від тривалості УЗО в середовищі: \diamond – дистильованої води; \square – ацетону; \triangle – ізопропільного спирту

Найбільша інтенсивність подрібнення забезпечується для суспензій у рідинному середовищі з високою ерозійною активністю рідини. Так, для води критерій ерозійної активності ($k \cdot 10^{-6}$) становить 80,0, а для ацетону – 0,1. На процес диспергування впливає і поверхневий натяг, а тому, щоб його зменшити, додаються поверхнево-активні речовини з метою створення на поверхні твердої фази надзвичайно тонко адсорбційних шарів, які сприяють процесу кавітації [4]. Так, введення ПАР за ма-

сою до 1% дало можливість частково запобігти відновленню агломератів до вихідних розмірів після сушіння суспензії.

Електронно-мікроскопічні дослідження засвідчили наявність у порошку значної кількості агломератів, які, в той же час, мають помітно менші розміри, а також спостерігається зміна їх форми – вони набувають форми, наближеної до рівноважної. В результаті УЗО на цьому рівні дослідження зафіксувати повне подрібнення агломератів УДП криохімічного порошку не вдається, одержали лише порошок з переважною кількістю агломератів із середнім діаметром 2-3 мкм для порошку $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ при середньому діаметру частинок близько 10 мкм для вихідного оксиду.

Характерну залежність зміни розмірів агломератів від часу диспергування наведено на рис. 6.

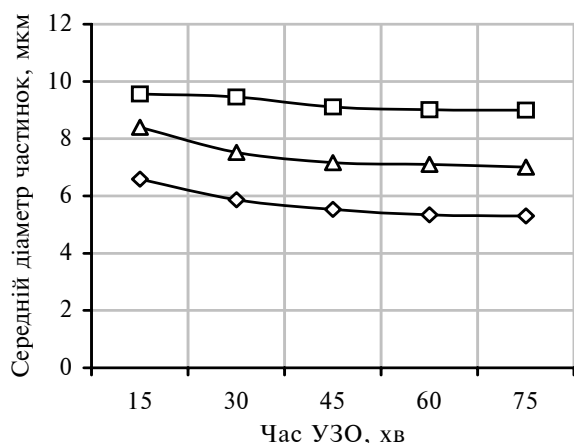


Рис. 6. Зміна середнього діаметра агломератів УДКХ порошку Al_2O_3 від тривалості УЗД в середовищі: ◇ – дистильованої води; □ – ацетону; △ – ізоприлового спирту

Для порівняння в аналогічних умовах було проведено дослідження з УЗО для традиційного порошку Al_2O_3 з питомою поверхнею $S_p = 7,79 \text{ м}^2/\text{г}$. Отримані дані показали, що подрібнення для такого порошку інтенсивно відбувається у перші 15–20 хв і при досягненні часу однієї години воно практично припиняється. При цьому за однаковий період часу подрібнення порошку відбувається менш інтенсивно (практично подрібнення відбувається на 20% менше) порівняно з криохімічним порошком Al_2O_3 і питома поверхня порошку збільшилася мало – до $S_p = 9,6 \text{ м}^2/\text{г}$.

Ефективність процесу руйнування багато в чому визначається характеристиками міцності тіла, яке руйнується.

Проте міцність реальних матеріалів значно нижча їх теоретичної міцності через наявність дефектів. Дефектність структури частинок порошку зумовлена величиною зерна, пористістю, хімічним складом, станом поверхні, характером напруженого стану.

Помітна різниця в результатах диспергування пояснюється тим, що частинки Al_2O_3 , отримані криохімічним методом, мають розгалужену структуру і високу пористість. Велика дефектність структури цих частинок значно полегшує подрібнення. Для руйнування агломератів, і особливо кристалітів, якими є частинки Al_2O_3 , енергії в кавітаційних бульбашках не вистачає, а тому в таких випадках УЗО відбувається при підвищених статичних тисках.

Наявність пористості в об'ємі частинок і агломератів криохімічного порошку прискорює процес їх руйнування в кавітаційних областях.

Застосування ультразвукової обробки криохімічних порошків дає можливість впливати на зменшення неоднорідності розподілу щільності по об'єму готового виробу.

У практиці порошкової металургії виробу, що виготовлені з таких порошків, як правило, мають покращені властивості і відрізняються більш високою якістю порівняно з виробами, отриманими з порошків без застосування УЗО.

Висновки

1. При ультразвуковій обробці порошку оксиду алюмінію найбільший ступінь диспергування досягається в середовищі дистильованої води.
2. Диспергування методом УЗО традиційного оксиду алюмінію відбувається менш інтенсивно завдяки більш досконалій кристалічній структурі на відміну від оксиду алюмінію з високою пористістю, отриманого за криохімічною технологією.
3. Подальше дослідження впливу УЗО на подрібнення УДКХ порошків дасть можливість вивчити фізичну природу зміни питомої поверхні таких порошків і використовувати результати досліджень для регулювання властивостями структури нових матеріалів.

С.О. Руденький

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА ПРОЦЕСС ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ И ЕГО СВОЙСТВА, ПОЛУЧЕННОГО КРИОХИМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Изучалось влияние ультразвуковой обработки (УЗО) на характер и степень измельчения традиционного оксида алюминия и агломератных образований в порошке оксида алюминия, полученного по криохимической технологии. Изучены некоторые свойства таких порошков.

S.O. Rudenkiy

THE STUDY OF ULTRASONIC TREATMENT INFLUENCE ON DISPERSION AND PROPERTIES OF ALUMINIUM OXIDE BY CRYOCHEMICAL METHOD

The paper under consideration studies the influence of ultrasonic treatment (UST) on character and degree of powdering of traditional aluminium oxide and agglomerate formations in aluminium oxide powders, obtained by cryochemical technology. The maximum degree of powdering is achieved in the distilled water at ultrasonic treatments of aluminium oxide powders. Moreover, it is determined that the dispersion of traditional aluminium oxide by the UST method is less intensive because of the more perfect crystalline structure, comparing with the aluminium oxide with high porosity, obtained by cryochemical technology.

1. Михайленко А.А., Фомина Г.А. Структура, свойства и применение порошков на основе Al_2O_3 , полученных методом криохимической технологии // Физика и химия обработки материалов. – 1990. – № 6. – С. 119–123.
2. Дудник Е.В. Свойства криохимической шихты // Новые порошковые материалы и технологии в машиностроении. – К.: ИПМ АН УССР, 1988. – С. 90–95.
3. Руденький С.О., Степанчук А.М. Високопориста кераміка на основі кріодисперсного порошку Al_2O_3 // Наукові нотатки. – Луцьк, 2003. – Вип. 13. – С. 286–295.
4. Агранат Б.А., Гудович А.П., Нежевенко Л.Б. Ультразвук в порошковой металлургии. – М.: Металлургия, 1986. – 168 с.

Рекомендована Радою
інженерно-фізичного факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
26 червня 2008 року

УДК 621.791.753

П.Ю. Сидоренко, Р.М. Рижов,
А.О. Золотовський, Г.П. Болотов

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІМПУЛЬСНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ДІЙ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПЕРЕНОСУ ЕЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛУ

Вступ

При дуговому зварюванні плавким електродом застосовуються механічні, електричні, магнітні і комбіновані способи керування процесом переносу електродного металу.

Недоліками механічного керування переносом електродного металу є малі амплітуда і частота вібрації електрода (до 100 коливань/с) [1]. Електричні способи характеризуються відсутністю додаткових апаратних засобів для їх реалізації, що є значною перевагою. Це зумовлює їх широке застосування в технологіях автоматичного зварювання конструкційних сталей і низьколегованих сплавів. Однак при імпульсно-дуговому зварюванні їх обмежено використовують для зварювання середньо- і складнолегованих сталей і сплавів, що пояснюється характерним для даних імпульсних дій перегріванням крапель електродного металу і, як наслідок, вигоранням його легкоплавких складових. До того ж, через характерні пульсації світлового потоку дуги імпульсно-дугові технології обмежено використовуються при ручному і напівавтоматичному зварюванні. Тому в практиці дугового зварювання набувають розвитку способи керування масопереносом за допомогою електромагнітних дій (ЕМД).

Аналіз літературних джерел показав, що для розв'язання таких задач найбільш ефективним способом є застосування ЕМД на основі імпульсних керуючих магнітних полів (КМП). Він ґрунтується на створенні силової дії на краплю розплавленого металу, яка виникає при взаємодії височастотного поля індуктора з індуктованим в її об'ємі струмом. Перевагами цього способу є вилучення перегріву поверхонь крапель, зменшення витрат електродного металу на розбризкування та забезпечення точності дозування процесу нанесення покриття при наплавленні. До того ж, існує можливість керувати не тільки процесом відриву крапель із торця електрода, а й формуванням траєкторії їх переміщення в заданому напрямку.

Постановка задачі

Зазначений спосіб керування процесом переносу крапель електродного металу застосовувався при дуговому дозованому паянні міддю і бронзою деталей малої товщини [2]. З врахуванням того, що його ефективність значною мірою залежить від електропровідності матеріалу зварювального дроту в розплавленому стані, і того, що в конструкційних і нержавіючих сталях дана властивість гірша, ніж у мідних сплавів, необхідно було проводити комплекс досліджень з метою виявлення оптимального діапазону параметрів ЕМД для різних зварювальних матеріалів. До того ж, параметри ЕМД слід узгоджувати з параметрами режиму зварювання, від яких істотно залежать як розміри крапель, так і частота їх переходу в зварювальну ванну. Зокрема, для збільшення величини вихрових струмів, генерованих в об'ємах крапель, необхідно забезпечувати вертикальний фронт імпульсів КМП. У зв'язку із складністю експериментальних досліджень у цьому напрямку більш раціональним є їх проведення за допомогою математичних моделей.

Таким чином, метою статті є розробка математичної моделі для визначення оптимальних параметрів керуючих магнітних полів для умов зварювання плавким електродом із врахуванням теплофізичних властивостей матеріалу краплі в розплавленому стані і електричних параметрів режиму зварювання.

Методика проведення досліджень

При визначенні сили, що створюється імпульсним КМП і діє в напрямку осі Z на краплі розплавленого металу на торці плавкого електроду користувались залежністю [3]

$$\mathbf{F} = \mathbf{P}_n \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial \mathbf{r}}, \quad (1)$$

де \mathbf{P}_n – магнітний момент, створений вихровими струмами в об'ємі краплі; $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial \mathbf{r}}$ – градієнт індукції магнітного поля.

Краплю розглядали як кулю радіуса r_k . У першому наближенні вважали, що в її об'ємі магнітне поле є однорідним. Виділимо в краплі кільце радіуса $r_1 = r \sin \alpha$, розміщене перпендикулярно вектору індукції магнітного поля (рис. 1), де r – радіус-вектор, що з'єднує центр краплі з даною точкою кільця; α – полярний кут.

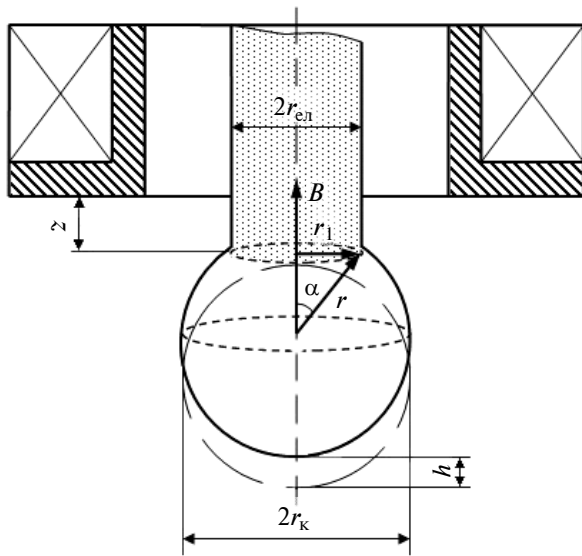


Рис. 1. Схема для розрахунку параметрів масопереносу електродного металу

Електричний опір кільця становить

$$R_i = \rho \frac{l}{dS} = \rho \frac{2\pi r \sin \alpha}{dr d\alpha},$$

де l та dS – відповідно довжина і площа перерізу кільця; ρ – питомий опір металу краплі; S – площа кільця: $S = \pi r^2 \sin^2 \alpha$. Із врахуванням зазначеного магнітний потік через кільце становить $\Phi = B \pi r^2 \sin^2 \alpha$, а вираз для знаходження ЕРС індукції в кільці має вигляд

$$\varepsilon_i = \frac{dB}{dt} \pi r^2 \sin^2 \alpha.$$

Індукований струм у кільці знаходиться із співвідношення

$$dI = \frac{\varepsilon_i}{R_i} = \frac{dB}{dt} \frac{1}{2\rho} r^2 \sin \alpha dr d\alpha.$$

Для розрахунку елемента магнітного моменту використовується вираз

$$dP_n = dIS = \frac{dB}{dt} \frac{1}{2\rho} r^2 \sin \alpha dr d\alpha \pi r^2 \sin^2 \alpha,$$

який після перетворень набуває вигляду

$$P_n = \frac{2\pi r_k^5}{15\rho} \frac{\partial B}{\partial t}.$$

Із врахуванням залежності (1) отримали формулу для визначення електромагнітної сили, що діє на краплю:

$$F_z = \frac{2\pi r_k^5}{15\rho} \frac{\partial B_z}{\partial t} \left(\frac{\partial B_r}{\partial r} + \frac{\partial B_z}{\partial z} \right). \quad (2)$$

Для здійснення оптимізації параметрів індукції імпульсного КМП формувались залежності, які містять теплофізичні властивості зварювального дроту і електричні параметри режиму зварювання, що впливають на процес його плавлення. Для цього розглядався баланс основних сил, що діють на краплі. При зварюванні в нижньому положенні маємо

$$P_{EMD} + P_{ED} + P_T > P_\sigma, \quad (3)$$

де P_{ED} , P_T і P_σ – відповідно електродинамічна сила, сила тяжіння і сила поверхневого натягу. Вони знаходились із залежностей [4, 5]

$$P_{ED} = \frac{\mu I_{зв}^2}{4\pi} \ln \frac{r_{ел}}{r_k}, \quad (4)$$

$$P_T = \rho_k V_k g, \quad (5)$$

$$P_\sigma = 2\pi \sigma_{м-г} \frac{r_{ел}^2}{r_k}, \quad (6)$$

де $g = 9,81$ м/с²; $\sigma_{м-г}$ – коефіцієнт поверхневого натягу на межі метал краплі–захисний газ (його величину вибирали за викладеним у праці [4]); $I_{зв}$ – зварювальний струм; μ і ρ_k – відповідно магнітна проникненість і густина розплаву краплі; V_k – її об'єм: $V_k = \frac{\pi}{6}(8r_k^3 - 12hr_{ел}^2 - h^2)$; h – відстань, на яку необхідно перемістити краплю для її відриву з торця електрода (рис. 1): $h = r_k - \sqrt{r_k^2 - r_{ел}^2}$; $r_{ел}$ – радіус електродного дроту ($r_{ел} \leq r_k$).

Підставивши (2) в (3), отримуємо залежність для розрахунку оптимального градієнта індукції $\frac{\partial B_z}{\partial z}$:

$$\frac{\partial B_z}{\partial z} > \frac{(P_\sigma - P_{ED} - P_T)}{\frac{2\pi r_k^5}{15\rho} \frac{\partial B_z}{\partial t}}. \quad (7)$$

Ця нерівність відповідає фізичним закономірностям. Із зменшенням радіуса r_k і збільшенням питомого опору розплаву крапель зменшу-

ється індукований в їх об'ємах струм, що призводить до зниження ефективності керування процесом масопереносу. Компенсація негативних змін досягається збільшенням індукції або крутизни переднього фронту імпульсів КМП. До того ж, частоту повторення імпульсів КМП слід узгоджувати з часом утворення крапель електродного металу заданого діаметра, який залежить від зварювального струму і теплофізичних властивостей дроту.

Експериментальне визначення параметрів масопереносу електродного металу при зварюванні з імпульсними ЕМД

Зміни параметрів масопереносу електродного металу при зварюванні з імпульсними ЕМД досліджували за методикою, що ґрунтується на наплавленні на мідний диск, що обертається із заданою кутовою швидкістю, яка в умовах експерименту дорівнювала 0,185 об/с. Наплавлення здійснювали на режимі: $I_{зв} = 150$ А; $U_0 = 22$ В; швидкість подавання електродного дроту діаметром $d_{др} = 1,2$ мм дорівнювала 85 мм/с; виліт електрода становив 30 мм. Високочастотні імпульси КМП у зоні зварювання генерувались почерговим розрядом високовольтних конденсаторів ємністю 100 мкФ на котушку індуктора, яка містила 24 витки мідного дроту, намотаних у чотири шари. Разом із системою водяного охолодження її було розміщено на зовнішній поверхні феромагнітного сопла. Конденсатори заряджались до напруги 600 В.

Частота розряду конденсаторів ($f_{імп}$) змінювалась з кроком 10 Гц за допомогою ввімкнених у коло живлення індуктора тиристорних контакторів, керованих від спеціалізованого генератора.

Періодично верхня поверхня диска діаметром 500 мм змашувалась протипригарною рідиною. Для забезпечення однакового часу горіння дуги, який у кожному експерименті становив 15 с, зварювальне джерело живлення, генератор імпульсів КМП і привід переміщення спеціалізованого пальника в напрямку до центра диска вмикали за допомогою пристрою керування з високоточним таймером. Обробка експериментальних даних починалася з вимірювання відстаней між сусідніми краплями, що необхідно для визначення частоти переносу. Після цього краплі розділялись на фракції за допомогою каліброваних ситечок і в такий спосіб оцінювались зміни їх діаметрів.

Було виявлено, що при зварюванні у звичайних умовах (на рис. 2 $f_{імп} = 0$ Гц) більшість крапель має діаметр 3–3,5 мм. Застосування високочастотних імпульсних ЕМД одночасно із збільшенням у 2–2,5 рази загальної кількості крапель призводило до істотного зменшення їх діаметрів. Підвищення частоти одинарних імпульсів КМП спричинювало посилення зазначеного позитивного ефекту. Найбільш помітно збільшувалась кількість крапель діаметром 1,5 мм (порівняно із звичайними умовами в 6–8 разів).

Перевірка адекватності математичної моделі

Процедура перевірки адекватності розробленої математичної моделі реальним умовам зварювання полягала в порівнянні розрахункових і експериментальних даних. Встановлено, що при зварюванні без ЕМД $f_{імп} = 0$ Гц (див. рис. 2) більшість крапель має діаметр 3–3,5 мм, що досить точно відповідає розрахунковим даним. Функції $(P_T + P_{ЕД} + P_{ЕМД})(d_{кр})$ і $P_{\sigma}(d_{кр})$ перетинаються вже при $d_{кр} = 1,7$ мм, що також відповідає експериментальним даним.

Проведений комплекс досліджень показав, що розрахункова схема відповідає фундаментальним законам фізики. Розрахункові і экс-

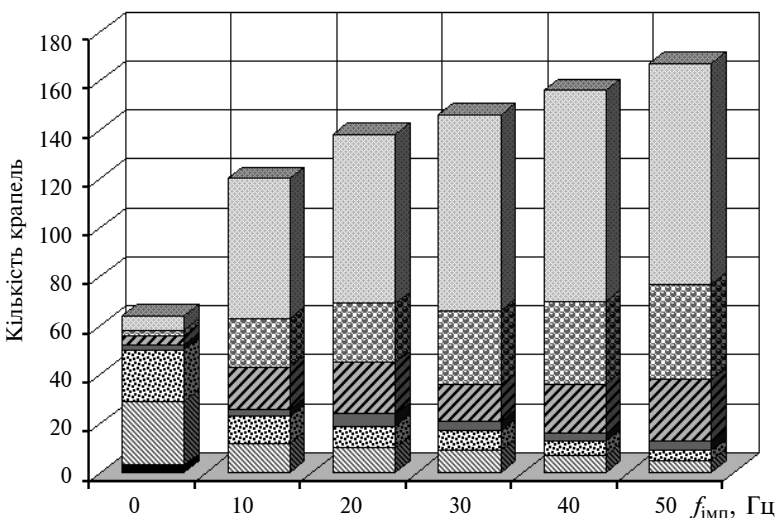


Рис. 2. Зміни при зварюванні з імпульсними ЕМД кількості крапель різних діаметрів $d_{кр}$ (в мм): ■ – 5; ▨ – 3,5; ▩ – 3; ▤ – 2,8; ▥ – 2,5; ▦ – 2; ▧ – 1,5

периментальні дані відрізняються не більше ніж на 10 відсотків. Це свідчить про адекватність розробленої розрахункової схеми і можливість її використання в даних дослідженнях.

Результати досліджень

Із збільшенням радіуса r_k зростає вага крапель і зменшується відстань, на яку їх треба перемістити для відриву краплі з торця електродного дроту. При цьому для керування процесом масопереносу необхідні менш інтенсивні ЕМД. Слід зазначити, що із збільшенням діаметра електродного дроту для відриву крапель однакового діаметра необхідні більші градієнти індукції $\frac{\partial B_z}{\partial z}$ і, відповідно, індукції на торці електрода B_{zm} (рис. 3, а, б). Це пояснюється від-

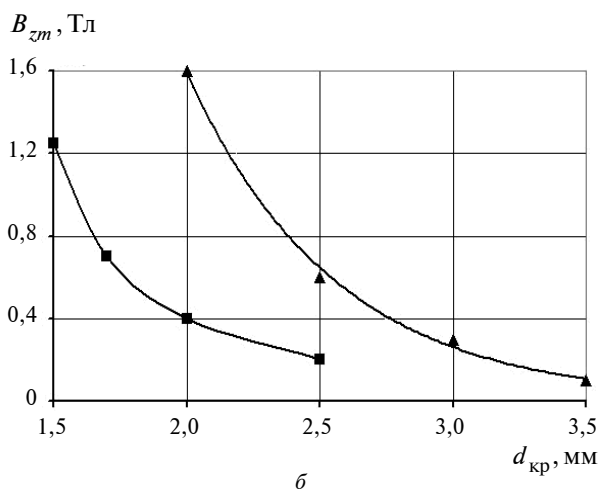
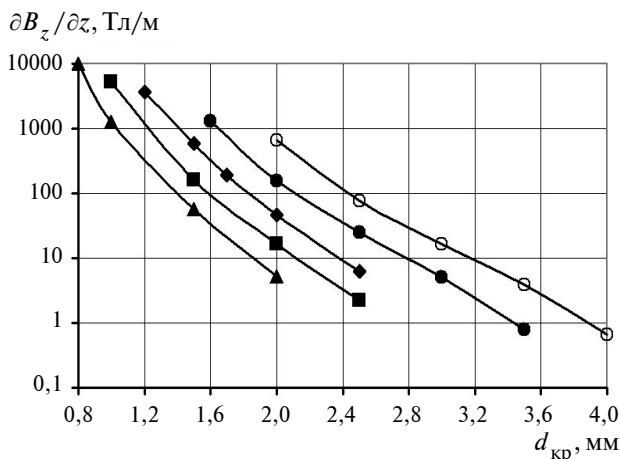


Рис. 3. Залежність параметра $\partial B_z/\partial z$ (а) і B_{zm} (б) від діаметра крапель: ▲, ■, ◆, ●, ○ – діаметр електродного дроту дорівнює відповідно 0,8, 1, 1,2, 1,6 і 2 мм

повідними змінами сили поверхневого натягу. Індукції B_{zm} знаходили за методикою, наведеною в працях [6, 7].

Баланс сил, що діють на краплі, аналізували з використанням системи кривих, побудованих за залежностями (2)–(6) (рис. 4). Виявлено, що в умовах експериментів електродна сила порівняно з іншими найменше впливає на процеси масопереносу електродного металу. У вихідних умовах діаметр крапель не може бути меншим за той, що визначається перетином функцій $(P_T + P_{ED})(d_{кр})$ і $P_\sigma(d_{кр})$ на рис. 4.

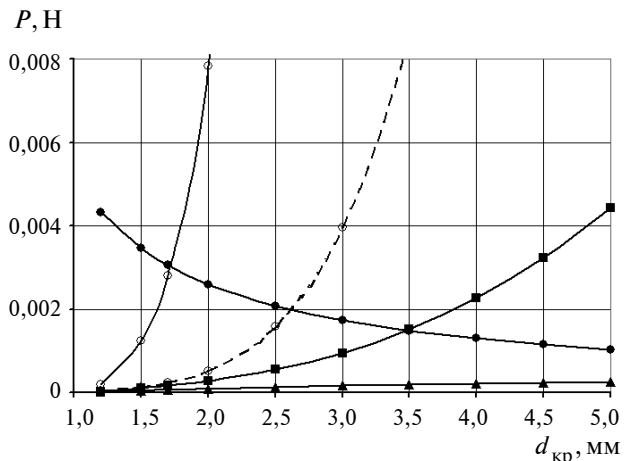


Рис. 4. Баланс сил, що діють на краплі електродного металу при зварюванні з імпульсними ЕМД: ▲ – P_{ED} ; ■ – P_T ; ● – P_σ ; ○ – P_{EMD} ; —, - - - - відповідно зварювання в нижньому і стельовому положенні

Розрахунки показали, що відрив крапель у звичайних умовах повинен відбуватись при $d_{кр} = 3,5$ мм. Застосування імпульсних ЕМД призводить до зміни балансу сил, що діють на краплі. Функції $(P_T + P_{ED} + P_{EMD})(d_{кр})$ і $P_\sigma(d_{кр})$ перетинаються вже при $d_{кр} = 1,7$ мм. При зварюванні в стельовому положенні сила тяжіння протидіє відриву крапель. При незмінних параметрах імпульсних ЕМД це призвело до збільшення їх діаметра до 2,6 мм.

Висновки

Для максимально ефективного керування за допомогою ЕМД процесом масопереносу електродного металу оптимальну індукцію імпульсного магнітного поля слід вибирати із врахуванням його хімічної композиції і заданого діаметра крапель.

Частота імпульсів КМП має відповідати частоті утворення крапель на торці електрода, яка у свою чергу залежить від параметрів режиму зварювання. До того ж, із збільшенням діаметра електродного дроту для відриву крапель однакового діаметра необхідні більші градієнти індукції, що пояснюється відповідними змінами сили поверхневого натягу.

Для подальшого розвитку досліджених імпульсних дій з метою комплексного керування процесами масопереносу електродного металу і кристалізації ванни необхідне застосування модульованих аксіальних магнітних полів, які отримують одночасним генеруванням у зоні зварювання КМП різної частоти.

П.Ю. Сидоренко, Р.Н. Рыжов, А.А. Золотовский, Г.П. Болотов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА

Разработана математическая модель для определения оптимальных параметров управляющих магнитных полей для условий сварки плавящимся электродом с учетом теплофизических свойств материала капли в расплавленном состоянии и электрических параметров режима сварки. Определены оптимальные градиенты и амплитуды индукции для эффективного управления процессом переноса электродного металла. Исследованы изменения параметров массопереноса при сварке с импульсными электромагнитными воздействиями.

P.Yu. Sidorenko, R.M. Ryzhov, A.O. Zolotovskiy, G.P. Bolotov

PARAMETERS DETERMINATION OF IMPULSIVE ELECTROMAGNETIC ACTIONS FOR THE PROCESS CONTROL OF ELECTRODE METAL TRANSFER

In this paper, we develop the mathematical model, which allows calculating the optimum parameters of the control magnetic field for welding by a consumable electrode, taking into account the thermo-physical material properties of drop in the molten state and electric parameters of welding conditions. Specifically, we determine the optimum gradients and amplitudes of induction for the effective control of electrodes metal transfer. We study the change of metal transfer parameters at welding with the pulsive electromagnetic operations.

1. *Ленивкин В.А., Дюргеров Н.Г., Сагиров Х.Н.* Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.
2. *Тарасов М.М., Капустин С.С.* Применение высокочастотного электромагнитного поля для дозированного переноса капель электродного металла // Автомат. сварка. – 1982. – № 8. – С. 10–12.
3. *Нейман Л.Р., Демирчан К.С.* Теоретические основы электротехники. Т. 1. – М.; Л.: Энергия, 1966. – 408 с.
4. *Пацкевич И.Р., Деев Г.Ф.* Поверхностные явления в сварочных процессах. – М.: Металлургия, 1974. – 120 с.
5. *Заруба И.И., Дименко В.В.* Эффект действия электромагнитной силы в расплавленном металле применительно к массопереносу в дуге // Автомат. сварка. – 1995. – № 2. – С. 22–32.
6. *Рыжов Р.М., Сидоренко П.Ю., Золотовский А.О.* Принципы конструирования специализованных пальников для дугового зварювання з електромагнітними діями // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2006. – № 1. – С. 54–59.
7. *Рыжов Р.Н., Сидоренко П.Ю., Золотовский А.А.* Зависимость параметров внешних электромагнитных воздействий от технологических особенностей дуговых способов сварки // Вестн. НТУУ “КПИ”. – 2005. – № 46. – С. 114–116.

Рекомендована Радою
зварювального факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
2 липня 2008 року

УДК 676.18

В.А. Барбаш, І.В. Трембус,
Д.М. Складанний**ОПТИМІЗАЦІЯ ОРГАНСОЛЬВЕНТНИХ СПОСОБІВ ОДЕРЖАННЯ СОЛОМ'ЯНОЇ ЦЕЛЮЛОЗИ****Вступ**

У наш час практично у всіх сферах промисловості і побуті широко використовується целюлозно-паперова продукція, що зумовлює сталий розвиток світової целюлозно-паперової промисловості (ЦПП). У зв'язку з обмеженістю власної сировинної бази ЦПП вітчизняні підприємства галузі спеціалізуються переважно на виробництві малотоннажних видів паперу та картону з використанням макулатури та імпортованої целюлози.

У більшості країн світу основною сировиною для виробництва целюлози є деревина. Однак для країн, які не мають великих запасів вільної деревини, зокрема для України, актуальною проблемою залишається пошук альтернативних джерел волокнистих напівфабрикатів (ВНФ) для ЦПП. До таких джерел ВНФ можуть бути віднесені різні представники – щорічно поновлювальні сільськогосподарські рослини. Серед цих рослин найчастіше у світовій практиці ЦПП для виробництва целюлози використовують соломку хлібних злаків, а саме пшеничну соломку [1]. За даними Міністерства аграрної політики, в Україні кожного року утворюється близько 20 млн т пшеничної соломи, яка може бути використана в ЦПП [2]. При виробництві целюлози в світовій ЦПП домінують сульфатний і сульфітний способи делігніфікації рослинної сировини, побічними продуктами яких є екологічно небезпечні сірко- та хлоропохідні лігніну (метилмеркаптани, діоксини, фурані). Цих недоліків можна позбутися, використовуючи при отриманні волокнистих напівфабрикатів із рослинної сировини органічні середовища – так звані органосольвентні варіння. Вони є екологічно безпечними, більш раціонально використовують рослинну сировину і потребують менших капіталовкладень на виробництво волокнистих напівфабрикатів.

Для делігніфікації деревини хвойних і листяних порід деревини вчені пропонують використовувати різні органічні розчини: аліфатичні і ароматичні спирти, надкислоти, карбонові і неорганічні кислоти, кетони та етери [3]. Але в літературі майже немає відомостей щодо застосування органосольвентних способів делігніфі-

кації однорічних рослин і відходів сільського господарства, які потребують враховувати особливості морфологічної будови та хімічного складу порівняно з деревиною при розробці технологій їх переробки.

Тому пошук оптимальних параметрів одержання солом'яної целюлози органосольвентними способами варіння є важливою науково-технічною задачею як для вітчизняної, так і для світової ЦПП.

Постановка задачі

Раніше нами було досліджено можливість одержання целюлози з пшеничної соломи різними органосольвентними способами делігніфікації [4–6]. Результати попередніх експериментів показали, що целюлоза, яка отримана з однорічних рослин органосольвентними методами делігніфікації, не поступається якісними показниками целюлозі з листяних порід деревини [7]. Проведені дослідження дають можливість стверджувати, що кращі фізико-механічні показники мають волокнисті напівфабрикати, отримані такими органосольвентними способами варіння пшеничної соломи, як лужно-сульфітно-спиртовий (ASAE), аміачно-сульфітно-спиртовий (ACC) і дво-стадійний лужно-сульфітний (2ЛС). Тому метою даної статті є оптимізація процесів одержання волокнистих напівфабрикатів із пшеничної соломи цими органосольвентними способами варіння.

Експериментальна частина

Для варіння целюлози використовували пшеничну соломку Київської області такого фракційного складу, %: стебла – 85; листя – 12; колосся – 3. Варіння пшеничної соломи проводили в сталевих автоклавах об'ємом 400 мл, занурених у гліцеринову баню, нагріту до необхідної температури. Режимом варіння органосольвентних солом'яних целюлоз вказаними вище методами делігніфікації наведені в табл. 1. Значення показників органосольвентних варінь взяті на основі проведених попередніх лабораторних досліджень.

На якісні показники органосольвентної солом'яної целюлози впливають технологічні чинники, які після ранжирування за ступенем впливу на вихідні змінні були розміщені в такій послідовності: температура варіння (X_1), тривалість процесу делігніфікації (X_2), рН середовища (X_3), гідромодуль (X_4), витрати антрахінону (X_5), ступінь ущільнення сировини (X_6), вологість рослинної сировини (X_7), хімічний склад сировини (X_8).

Таблиця 1. Режими органосольвентних варінь пшеничної соломи

Технологічні параметри	Органосольвентні способи делігніфікації		
	ASAE	ACC	2ЛС
Варильний розчин	NaOH–Na ₂ SO ₃ –C ₂ H ₅ OH–H ₂ O–AQ	NH ₃ –SO ₂ –C ₂ H ₅ OH–AQ	NaOH–C ₂ H ₅ OH–H ₂ O–AQ
Об'ємні співвідношення C ₂ H ₅ OH:H ₂ O, %	35:65	35:65	I ступінь 50:50 II ступінь 30:70
Делігніфікуючі речовини в розчині, % від маси абсолютно сухої сировини	25%NaOH–Na ₂ SO ₃ (із них 80%Na ₂ SO ₃ і 20%NaOH) + 0,1%AQ	10%SO ₂ + 15%NH ₃ + 0,1% AQ	15% NaOH + 0,1% AQ
Температура варіння, °С	130–170	130–150	110–130
Тривалість варіння, хв	60–150	30–150	120–210

Оскільки для органосольвентних варінь використовувалася пшенична солома із сталими значеннями гідромодуля, рН варильного розчину, витрат антрахінону, вологості, хімічного складу, ступеня ущільнення, то ці фактори були сталими для кожного способу делігніфікації на початку варіння, не істотно змінюються в процесі дослідження і тому їх вилучено з подальших розрахунків. Попередніми дослідженнями встановлено, що такі фактори процесу делігніфікації, як температура (X_1) і тривалість (X_2) варіння суттєво впливають на якісні показники солом'яної целюлози (Y_i) і тому потребують визначення оптимальних значень. За вихідні показники солом'яної целюлози Y_i , що визначають якість органосольвентної солом'яної целюлози, нами було вибрано: вихід целюлози (Y_1), ступінь делігніфікації (Y_2), вміст залишкового лігніну (Y_3), розривна довжина (Y_4), міцність на злам при багаторазових перегибах (Y_5), опір роздиранню (Y_6), опір продавлюванню (Y_7).

Для одержання статистичних математичних моделей для кожного вихідного показника якос-

ті Y_i процесу одержання солом'яної целюлози органосольвентними способами варіння ASAE, ACC та 2ЛС використовувався повний факторний експеримент типу 2². Статистична математична модель процесу варіння целюлози для двох незалежних змінних має такий вигляд [8]:

$$Y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2 + b_4x_1^2 + b_5x_2^2, \quad (1)$$

де Y_i – показник якості солом'яної целюлози; $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$ – коефіцієнти математичної моделі; x_1 і x_2 – значення факторів процесу варіння в кодованій формі.

Розрахунок коефіцієнтів математичних моделей процесів варіння солом'яної целюлози для кожного показника якості (Y_i) і перевірку адекватності одержаних статистичних моделей проведено за програмою STAT-SENS, яка розроблена на кафедрі кібернетики хіміко-технологічних процесів НТУУ “КПІ”. Значення коефіцієнтів математичних моделей для кожного з органосольвентних способів отримання солом'яних целюлоз наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Значення коефіцієнтів математичних моделей процесів варіння солом'яної целюлози різними органосольвентними способами делігніфікації

Коефіцієнти	Показники якості органосольвентних целюлоз (Y_i)						
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7
ASAE							
b_0	60,606	16,727	3,104	9123,1	363,53	640,16	552,44
b_1	-3,971	-4,150	-1,103	-586,51	-76,39	-157,53	-70,37
b_2	-1,269	-2,503	-0,375	604,99	113,67	120,66	44,19
b_3	0,009	-0,214	0,123	161,89	-75,43	9,05	-3,76
b_4	-0,227	-0,520	-0,111	-441,12	-53,48	-35,71	-32,23
b_5	-0,195	0,031	0,011	48,80	-2,61	-12,62	7,88

Кінець табл. 2

Коефіцієнти	Показники якості органосольвентних целюлоз (Y_i)						
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7
ACC							
b_0	77,005	31,542	5,176	8880,7	401,16	603,30	515,63
b_1	-3,512	-6,038	-1,407	-259,23	-56,45	0,88	-8,79
b_2	-5,189	-10,210	-1,443	1590,1	200,88	209,27	108,86
b_3	-0,744	0,885	0,445	95,18	-26,68	-13,44	10,98
b_4	-0,862	-0,463	-0,623	253,27	48,54	56,23	7,45
b_5	2,231	5,213	1,037	-809,15	-45,85	33,48	-20,21
2ЛС							
b_0	59,765	30,596	7,612	8734,4	297,63	370,74	537,75
b_1	-2,012	-3,525	-0,712	831,25	54,50	73,70	73,87
b_2	-3,215	-4,000	-0,940	612,50	108,50	37,89	47,90
b_3	0,082	0,075	0,172	78,75	29,40	11,85	-26,62
b_4	-0,762	-1,050	-0,062	381,25	41,00	7,20	-72,12
b_5	0,243	-0,712	0,112	28,12	12,37	-9,21	-9,00

Для пошуку оптимальних значень параметрів проведення технологічних процесів, як відомо, існують різні методи оптимізації [8]. Одним із найбільш поширених способів розв'язання задачі оптимізації параметрів технологічних процесів за кількома показниками якості є об'єднання критеріїв (показників якості) з використанням узагальненої функції бажаності Харрінгтона (D). При її побудові натуральні значення окремих показників якості Y_i перетворюють у безрозмірну шкалу бажаності d в інтервалі зміни від 0 до 1. Більше чисельне значення оцінки на шкалі бажаності відповідає більшій бажаності – від “дуже погано” ($d = 0,20-0,00$) до “дуже добре” ($d = 1,00-0,80$) [9]. Графічні залежності узагальненої функції бажаності D , як середньогеометричного окремих бажаностей d на площині технологічних факторів X_1-X_2 показують узгодження між усіма показниками якості Y_i .

Для визначення оптимальних значень технологічних параметрів одержання відповідних органосольвентних солом'яних целюлоз за узагальненою функцією бажаності Харрінгтона визначалися обмеження по кожному з показників якості Y_i , що наведені в табл. 3.

Розраховані оптимальні значення параметрів X_i у кодованій формі для кожного органосольвентного способу становлять: для ASAE – $X_1 = -0,48$ і $X_2 = 1$; для ACC – $X_1 = -1$ і $X_2 = 1$;

для 2ЛС – $X_1 = 1$ і $X_2 = 0,55$. Оптимальні значення параметрів X_i у натуральній формі та отримані значення показників якості Y_i для кожної з цих целюлоз у точці оптимуму наведені в табл. 4.

Таблиця 3. Обмеження показників якості целюлоз (Y_i) для різних органосольвентних способів делігніфікації пшеничної соломи

Показник якості органосольвентної солом'яної целюлози	Найкраще значення			Найгірше значення		
	ASAE	ACC	2ЛС	ASAE	ACC	2ЛС
Вихід целюлози Y_1 , %	70	85	65	50	70	55
Ступінь делігніфікації Y_2 , од. Каппа	8	20	22	25	55	36
Вміст залишкового лігніну Y_3 , %	1	3	6	5	9	10
Розривна довжина Y_4 , м	10000	10000	11000	7000	7000	8000
Міцність на злам при багаторазових перегибах Y_5 , число подвійних перегинів	600	700	550	200	200	200

Кінець табл. 3

Показник якості органосольвентної солом'яної целюлози	Найкраще значення			Найгірше значення		
	ASAE	ACC	2ЛС	ASAE	ACC	2ЛС
Опір роздиранню Y_6 , мН	1000	900	500	300	400	270
Опір продавлюванню Y_7 , кПа	700	600	570	300	350	310

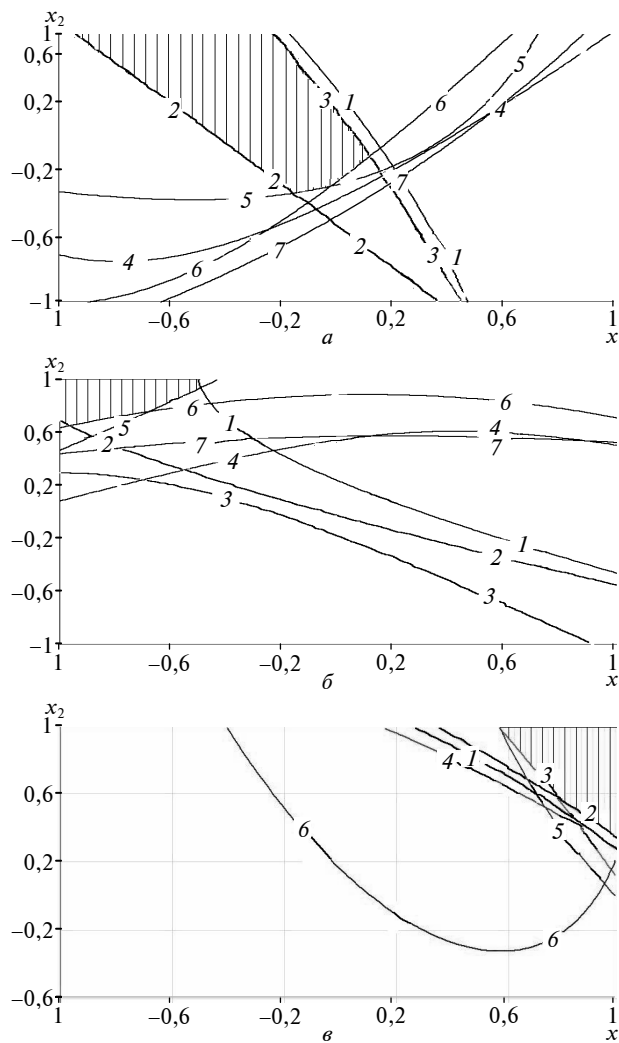
Знайдені оптимальні значення X_i і Y_i та результати розрахунків значення узагальненої функції бажаності D свідчать про те, що найкращу узгодженість показників якості органосольвентних целюлоз Y_i при визначених оптимальних значеннях технологічних факторів X_i має лужно-сульфітно-спиртовий спосіб делігніфікації пшеничної соломи (функція бажаності D для цього способу варіння рослинної сировини має найбільше значення).

Крім задачі багатокритеріальної оптимізації, було також розглянуто задачу пошуку компромісних умов проведення органосольвентних варінь пшеничної соломи, які забезпечують високу якість одержаної солом'яної целюлози за всіма показниками якості Y_i . Така задача розв'язувалась шляхом побудови компромісної області на площині технологічних факторів X_1 – X_2 .

Таблиця 4. Оптимальні технологічні параметри проведення органосольвентних варінь та показники якості солом'яних органосольвентних целюлоз у точці оптимуму

Показники	ASAE	ACC	2ЛС
Фактори X_i:			
температура варіння X_1 , °С	140	130	130
тривалість варіння X_2 , хв	150	150	190
Змінні функції Y_i:			
вихід целюлози Y_1 , %	61	77	55
ступінь делігніфікації Y_2 , од. Каппа	16,2	31,2	23,6
вміст залишкового лігніну Y_3 , %	3,2	5,1	6,5
розривна довжина Y_4 , м	9880	10080	10330
міцність на злам при багаторазових перегибах Y_5 , число подвійних перегинів	535	685	470
опір роздиранню Y_6 , мН	810	915	475
опір продавлюванню Y_7 , кПа	630	610	580
Функція бажаності D	0,6495	0,6365	0,6248

На рисунку компромісні області для досліджених органосольвентних систем зображені заштрихованими сегментами, що утворюються лініями показників якості целюлози при вказаних на них числових значеннях.



Компромісні області проведення процесів лужно-сульфітно-спиртового (а), аміачно-сульфітно-спиртового (б), двостадійного лужно-спиртового (в) варіння пшеничної соломи, що утворені лініями показників якості целюлози з відповідними числовими значеннями: а – 1 – $Y_1 = 60\%$; 2 – $Y_2 = 18,0$ од. Каппа; 3 – $Y_3 = 3\%$; 4 – $Y_4 = 9000$ м; 5 – $Y_5 = 350$ подвійних перегинів; 6 – $Y_6 = 600$ мН; 7 – $Y_7 = 550$ кПа; б – 1 – $Y_1 = 76\%$; 2 – $Y_2 = 32,0$ од. Каппа; 3 – $Y_3 = 5,5\%$; 4 – $Y_4 = 9500$ м; 5 – $Y_5 = 600$ подвійних перегинів; 6 – $Y_6 = 570$ мН; 7 – $Y_7 = 810$ кПа; в – 1 – $Y_2 = 25,0$ од. Каппа; 2 – $Y_3 = 6,6\%$; 3 – $Y_4 = 10000$ м; 4 – $Y_5 = 430$ подвійних перегинів; 5 – $Y_6 = 450$ мН; 6 – $Y_7 = 545$ кПа

Проведене лужно-сульфітно-спиртове варіння солом'яної целюлози при розрахованих оптимальних значеннях технологічних параметрів дало можливість отримати целюлозу, яка мала фізико-механічні показники, близькі до наведених у табл. 4 значень (похибка становила $\pm 10\%$).

Після вибілювання цієї целюлози за схемою: трилон Б—пероксид водню—кислотування з витратами пероксиду водню 5% від маси абсолютно сухої сировини було отримано целюлозу, яка мала 80% білості, що давало змогу використовувати її замість вибіленої деревної целюлози в композиції різних видів картонно-паперової продукції.

Висновки

Проведені в статті розрахунки дають підставу стверджувати, що лужно-сульфітно-спиртовий спосіб делігніфікації пшеничної соломи є одним із найбільш придатних серед досліджених спо-

собів одержання органосольвентної солом'яної целюлози.

У подальших дослідженнях буде вивчено можливість використання вибіленої та невибіленої лужно-сульфітно-спиртової солом'яної целюлози, отриманої за оптимальних значень технологічних параметрів, в композиції широкого кола паперів та картону для заміни більш дорогих целюлоз із деревини. Буде визначено пріоритетний напрямок їх цільового застосування для подальшого одержання готової продукції на папероробних (картоноробних) машинах, який відповідатиме світовому рівню виробництва паперу та картону.

В.А. Барбаш, І.В. Трембус, Д.М. Складанный

ОПТИМИЗАЦИЯ ОРГАНОСОЛВЕНТНЫХ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ СОЛОМЕННОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

В результате математической обработки полученных экспериментальных данных с помощью полного факторного эксперимента типа 2^2 были рассчитаны адекватные статистические модели процесса делигнификации пшеничной соломы щелочно-сульфитно-спиртовым, аммиачно-сульфитно-спиртовым и двухстадийным щелочно-спиртовыми способами варки с использованием антрахинона. Проведен поиск оптимальных значений технологических параметров процессов с использованием критерия Харрингтона. Установлено, что наиболее пригодным для получения соломенной целлюлозы является щелочно-сульфитно-спиртовый способ делигнификации соломы пшеницы.

V.A. Barbash, I.V. Trembus, D.M. Skladanny

OPTIMIZATION OF ORGANOSOLVENT METHODS FOR OBTAINING STRAW PULP

The present paper considers the adequate statistical models of delignification of the wheat straw by alkaline-sulphite-alcohol, ammonium-sulphite-alcohol and double-stage alkaline-alcohol methods, using anthraquinone, obtained as a result of mathematical treatment and full factorial experiment of 2^2 type. Furthermore, using Harrington criterion, we carry out the search for optimal values of technological parameters. Specifically, we establish that the alkaline sulphite-alcohol method turns out to be the most suitable for obtaining straw pulp.

1. *Арисон Дж.* Роль однолетних растений как сырьевого ресурса для целлюлозно-бумажной промышленности // *Paip and Paper.* — 1995. — № 7. — С. 125–131.
2. *Сырье — солома* // *Целлюлоза. Бумага. Картон.* — 2007. — № 2. — С. 7.
3. *Барбаш В.А., Примаков С.П.* Получение целлюлозы с применением органических растворителей (обзор) // *Химия древесины.* — 1991. — С. 5–14.
4. *Барбаш В.А., Трембус І.В.* Сольволізні варіння целюлози з пшеничної соломи // *Наукові вісті НТУУ "КПІ".* — 2002. — № 1. — С. 119–125.
5. *Барбаш В.А., Трембус І.В.* Органосольвентный способ получения волокнистых полуфабрикатов из отходов сельского хозяйства // *Экотехнология и ресурсосбережение.* — 2002. — № 6. — С. 29–32.
6. *Барбаш В.А., Трембус І.В.* Получение соломенной органосольвентной целлюлозы с применением химических добавок // *Там же.* — 2006. — № 2. — С. 42–45.
7. *Непенин Н.Н., Непенин Ю.Н.* Технология целлюлозы: В 3 т. — Т. 3. Очистка, сушка и отбелка целлюлозы. Прочие способы производства целлюлозы. — М.: Экология, 1994. — 592 с.
8. *Бондар А.Г., Статюха Г.О., Потяженко И.А.* Планирование эксперимента при оптимизации процессов химической технологии. Алгоритмы и примеры. — К.: Вища шк., 1980. — 264 с.
9. *Ахназарова С.Л., Кафаров В.В.* Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. — М.: Высш. шк., 1985. — 328 с.

Рекомендована Радою інженерно-хімічного факультету НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
26 червня 2006 року

УДК 621.357.7

М.І. Донченко, Р.М. Редько,
О.В. Нагорний, Т.І. Мотронюк

ВПЛИВ ІМПУЛЬСНОГО СТРУМУ НА ЕЛЕКТРООСАДЖЕННЯ НІКЕЛЮ ІЗ СУЛЬФАМАТНИХ ЕЛЕКТРОЛІТІВ

Вступ

Сульфаматні електроліти нікелювання найчастіше використовуються в гальванопластиці для отримання товстих шарів осадів. Це зумовлено високою розчинністю сульфамату нікелю, великою швидкістю електроосадження металу та пластичністю осадів нікелю [1]. Але навіть в оптимальних умовах експлуатації електролітів (при високій концентрації нікелю, підігріву, перемішуванні або циркуляції розчину, безперервній фільтрації, буферуванні для підтримки заданого значення рН) нарощування осадів товщиною кілька міліметрів затрудняється через дендритоутворення та гідроліз сульфамінової кислоти. Останній процес прискорюється при підвищеній температурі і веде до накопичення в розчині іонів амонію, які при досяганні певної концентрації негативно впливають на якість осадів.

На сьогодні відомо ряд різних способів зменшення дендритоутворення при формуванні електролітичних осадів. Це, наприклад, регулювання складу електролітів, використання комплексних сполук металів, введення в розчини добавок ПАР, періодичні перерви електролізу для шліфування або полірування поверхні. Інколи застосовується також безперервна механічна обробка металу безпосередньо в процесі електроосадження. Перспективним вважається нестационарний електроліз, зокрема, моно- або біполярний імпульсний струм [2–4]. Висока амплітуда струму в період імпульсу і наявність паузи сприяють утворенню гладеньких дрібнокристалічних осадів, а використання імпульсів зворотного струму може спричинити розчинення виступів та дендритів.

Постановка задачі

Дана стаття є першим етапом досліджень, присвячених удосконаленню процесу осадження нікелю із сульфаматних електролітів у напрямку зменшення величини кристалів осаду,

одержання блискучих покриттів у відсутності органічних добавок блискоутворювачів. Мета її полягає у виявленні впливу параметрів монополярного імпульсного струму на морфологію осаду та вихід за струмом нікелю.

Методика експерименту

Електроосадження нікелю проводилось у розчині такого складу (г/л): сульфамат нікелю – 300; хлорид нікелю – 10; борна кислота – 30; лаурилсульфонат натрію – 0,05–1; сахарин – 0–0,5.

Осадження здійснювалось при температурі 19 ± 2 °С, оскільки підвищення температури призводить до зменшення стабільності електроліту. Кілька дослідів виконувались при 50 °С. Кислотність розчинів вимірювалась іономіром типу ЕВ-74 і регулювалась додаванням сульфамінової кислоти або карбонату нікелю. Величина рН підтримувалась у межах 3,5–4,2.

Розчини готувались розчиненням у дистильованій воді реактивів марки ХЧ або ЧДА. Як катод використовувалась мідна електролітична фольга товщиною 100 мкм або електролітичний нікель товщиною 200 мкм, анод – пластини з нікелю марки НПАН, які розміщувались у мішках з хлоринової тканини з метою запобігання попадання в катодний осад шламу з анодів. Електроосадження проводилось у прямокутній комірці з вертикально розташованими електродами. Товщина осаду варіювалась від 3 до 40 мкм, при 50 °С – до 400 мкм. Перед дослідом катоди знежирювались віденським вапном, протравлювались у розчині соляної кислоти (1:1) та промивалися проточною водопровідною і дистильованою водою.

Катодні поляризаційні характеристики нікелю визначалися за допомогою потенціостата ПИ-50-1-1, програматора ПР-8 та самописця ПДА-1. Швидкість розгортки потенціалу становила 2 мВ/с. Зміна потенціалу в часі при електроосадженні нікелю імпульсним струмом записувалась на осцилографі С8-13. Потенціали металів вимірювались відносно хлор-срібного електрода порівняння.

Осадження нікелевих покриттів проводилось у режимі постійного та імпульсного струму при використанні програматора для задання імпульсів прямокутної форми. Середня густина струму для кожної серії дослідів витримувалась однаковою. Частота імпульсного струму (ІС) розраховували за формулою

$$f = 1/T = 1/(\tau_{\text{ім}} + \tau_{\text{п}}), \quad (1)$$

де T – період імпульсного струму; $\tau_{\text{ім}}$ – тривалість імпульсу; $\tau_{\text{п}}$ – тривалість паузи.

Шпаруватість струму визначалась за формулою

$$Q = T/\tau_{\text{ім}} = (\tau_{\text{ім}} + \tau_{\text{п}})/\tau_{\text{ім}} = 1 + \tau_{\text{п}}/\tau_{\text{ім}}. \quad (2)$$

Якщо врахувати, що середня густина струму $i_{\text{сеп}}$ за один період становить

$$i_{\text{сеп}} = i_{\text{ім}} \tau_{\text{ім}}/T, \quad (3)$$

де $i_{\text{ім}}$ – амплітудне значення густини струму, то величину $i_{\text{ім}}$ для заданої середньої густини можна розрахувати за формулою

$$i_{\text{ім}} = i_{\text{сеп}} Q. \quad (4)$$

Для підтримки сталого значення середньої густини струму варіювання Q супроводжувалось відповідною зміною амплітудної густини струму $i_{\text{ім}}$.

Вихід за струмом нікелю визначався за масою осаду при умові, що кількість електрики, витраченої на осадження, дорівнює $i_{\text{сеп}} \tau$, де τ – термін всього процесу осадження.

Морфологія і структура електролітичних осадів досліджувалась за допомогою електронного (РЕМ-103) і тунельного (ТЕМТ-100) мікроскопів.

Результати експерименту і їх обговорення

Без добавки сахарину в режимі постійного струму нікель осаджується у вигляді напівблискучих покриттів до товщини 3 мкм. Із зростанням товщини осаду блиск зникає, а при товщині ≥ 12 мкм утворюються матові світлі покриття. Зважаючи на те, що мідна основа була блискучою, можна припустити, що нікель у тонких шарах відтворює морфологію основи, а власне електроліт не має блискоутворюючої здатності. Робоча густина постійного струму не перевищує 2 А/дм². Вихід за струмом нікелю (ВС) становить 85–90 %. При збільшенні густини струму ВС знижується внаслідок прискорення побічної реакції виділення водню; якість осаду погіршується, з'являються "підгари" та дендрити або зелені гідроксиди нікелю.

Використання імпульсного струму (ІС) при відношенні тривалості паузи до імпульсу $\tau_{\text{п}}/\tau_{\text{ім}} =$

$= 2-10$ дозволяє одержувати блискучі покриття при товщині до 20 мкм. Аналогічні результати, але при значно більших густинах струму – до 30 А/дм², отримано в гарячих (50 °С) розчинах, тобто використання імпульсного струму сприяє одержанню блискучих покриттів замість напівблискучих чи матових. Вихід металу за струмом залежить від режиму електролізу, а саме зменшується при збільшенні шпаруватості і зниженні частоти ІС. Збільшення шпаруватості здійснювалось за рахунок подовження паузи при сталій тривалості імпульсу. При цьому для збереження постійної величини середньої густини струму підвищувалось амплітудне значення катодної густини струму згідно з рівнянням (4). Ймовірно, що це є причиною прискорення реакції виділення водню і відповідного падіння виходу за струмом нікелю при зростанні Q (рис. 1).

Потенціал катода в період імпульсу зміщується в часі у від'ємний бік, що особливо помітно при застосуванні коротких імпульсів (0,2–2 мс). Чим більшою є тривалість імпульсу, тим більш від'ємним стає амплітудне значення потенціалу і тим швидше відбувається побічний процес виділення водню. Це й призводить до зниження величини ВС із зменшенням частоти імпульсного струму. Максимальне значення ВС ≈ 96 % досягається при шпаруватості 3 і 6 та тривалості імпульсу 1 мс. Саме такі режими дають можливість отримувати найбільш блискучі компактні покриття.

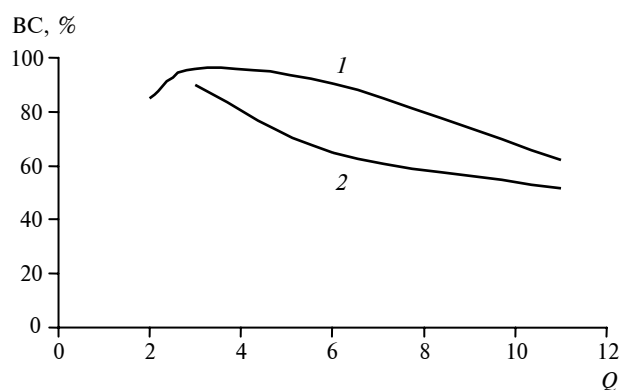


Рис. 1. Залежність виходу за струмом нікелю від шпаруватості при різних тривалості імпульсу, мс: 1 – 1; 2 – 10

Для покращення якості осадів в електроліт вводилась добавка сахарину. Відомо, що сахарин збільшує блиск і зменшує внутрішні напруження нікелевих осадів [5, 6], а це особливо важливо в умовах одержання товстих покриттів у гальванопластиці.

Дійсно, навіть у “холодних” електролітах при введенні сахарину покращується блиск покриттів. Але в умовах стаціонарного електролізу із зростанням товщини все ж таки відбувається перехід від блискучих до напівматових покриттів, а також спостерігається пітингування. Останній фактор може спричинятися конкуренцією адсорбції сахарину й антипітингової добавки – лаурилсульфонату натрію.

Використання імпульсного струму перешкоджає утворенню пітингів і полегшує відрив пухирців водню від поверхні катода. Це, вірогідно, пояснюється зростанням напруженості електричного поля і негативного заряду поверхні катода при високій амплітудній густині струму в імпульсі. Відомо [7], що утворені на катоді пухирці водню мають негативний заряд внаслідок адсорбції гідроксид-іонів, які накопичуються в приелектродному шарі. Тому вони відштовхуються від поверхні катода, відриваються тим легше і мають тим менший розмір, чим більшою є катодна густина струму і чим істотніше підлучення прикатодного шару. Саме це реалізується при використанні імпульсного струму: амплітудне значення густини ІС перевищує густину постійного струму в три рази при $\tau_{\text{п}}/\tau_{\text{ім}} = 2$, в шість разів – при $\tau_{\text{п}}/\tau_{\text{ім}} = 5$.

У монографії [2] полегшення відриву пухирців водню від поверхні катода при осадженні нікелю із сульфатного розчину пояснюється періодичною різкою зміною в часі потенціалу й, внаслідок цього – кута змочування на межі фаз. Вважається [8], що зміна поверхневого натягу залежно від стрибка потенціалу при осадженні металів імпульсним струмом впливає також на стадію розряду. Зменшення пористості нікелевих покриттів відзначається як перевага імпульсних режимів електроосадження нікелю і в інших електролітах, наприклад в ацетат-хлоридному [9] та сульфатному [2].

Робоча допустима густина струму (РГС) осадження металу в імпульсному режимі залежить від низки протилежно направлених факторів. Підвищення поляризації процесу веде до зменшення величини кристалів, що дозволяє наблизити РГС до граничної густини струму (звичайно, РГС електроосадження металів становить приблизно половину граничної густини струму). Виділення великої кількості маленьких пухирців водню інтенсифікує перемішування прикатодного шару і зменшення дифу-

зійних обмежень, що сприяє збільшенню РГС. З іншого боку, підвищення амплітудної густини струму в період імпульсу погіршує рівномірність розподілу струму по поверхні катода. Вважається, що з цієї причини використання імпульсного струму часто знижує розсіювальну здатність електролітів. Локальні густини струмів на виступаючих ділянках, на ребрах та кутах можуть досягати граничного значення, зумовленого масопереносом іонів нікелю або іонів водню. В таких випадках може спостерігатися “підгар” покриття або утворення гідроксидів нікелю, що обмежує РГС. Експериментальні результати даного дослідження свідчать, що імпульсний струм у “холодному” сульфатному електроліті істотно не підвищує робочої густини струму.

Для визначення граничної густини струму отримали хронопотенціометричні криві осадження нікелю в гальваностатичному режимі (рис. 2), які показують, що в розчинах з добавкою сахарину при густинах струму $i \geq 4$ А/дм² потенціал з часом різко зміщується у від’ємний бік. Чим вища густина струму, тим раніше починається цей процес. Такий характер кривих свідчить про збіднення приелектродного шару за іонами, які розряджаються – іонами нікелю і гідроксонію. Поява на катоді плівки гідроксидів нікелю свідчить про значне підлучення прикатодного шару і підтверджує можливість досягання граничного струму виділення водню. У статті [10] доведено, що подібне явище може реалізуватися при електроосадженні нікелю навіть при об’ємному значенні рН 2.

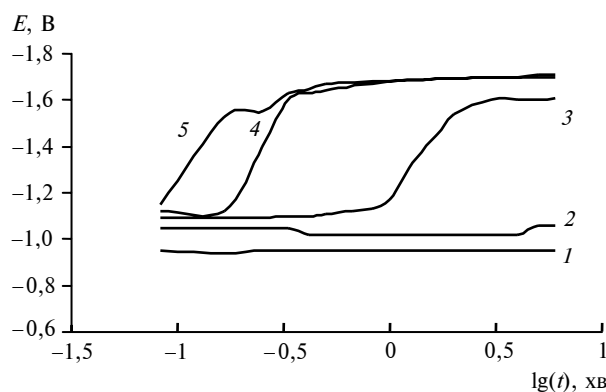


Рис. 2. Зміна потенціалу осадження нікелю в сульфатному електроліті на постійному струмі i , А/дм²: 1 – 1; 2 – 3; 3 – 4; 4 – 5; 5 – 6

Таким чином, гранична густина струму становить 4, а робоча – 2 А/дм².

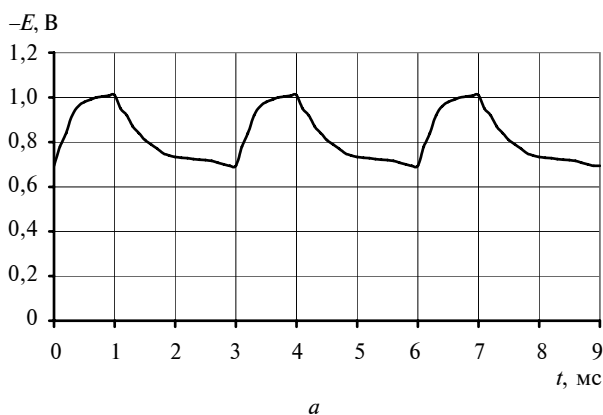
У режимі імпульсного струму величина потенціалу не встигає встановлюватися постійною, особливо в період коротких імпульсів (рис. 3). Тим більше, в період паузи потенціал є далеким від свого стаціонарного значення. Стаціонарне значення потенціалу після виключення катодного струму досягається за 6–10 хв залежно від густини струму осадження. Таке повільне зміщення потенціалу пов'язане з малим струмом обміну реакції розряду-іонізації Ni^{2+}/Ni .

Використання ІС параметрів ($\tau_{\text{ім}} : \tau_{\text{п}} = 1:2; 1:5; 1:10$) значно зменшує величину кристалів нікелю (рис. 4), при цьому блиск покриттів зберігається при нарощуванні їх великої товщини. Більш того, на підкладці з матового нікелю блиск поверхні з'являється саме при нарощуванні певної товщини покриття. Це є свідченням блискоутворення в результаті дії імпульсного режиму електроосадження. Величина кристалів нікелю зменшується з підвищенням шпаруватості імпульсів, що може бути пов'язано

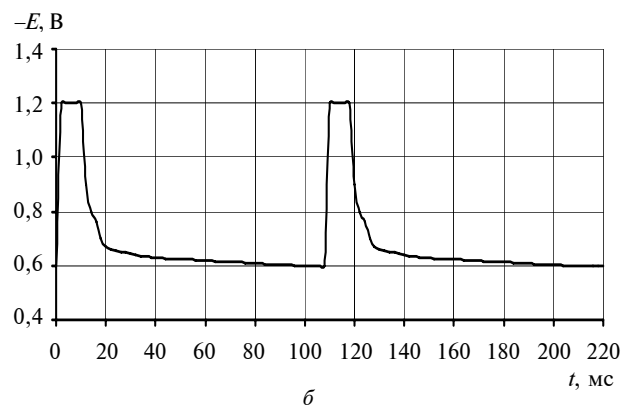
но з деяким зростанням поляризації осадження металу в період імпульсу (таблиця).

Підвищення шпаруватості реалізувалося за рахунок подовження паузи імпульсного струму, що, як відомо, сприяє частковій пасивації поверхні осаду в період паузи та появи нових центрів кристалізації осаду при включенні імпульсу струму. В результаті дисперсність осаду зростає. Розмір зерна нікелю в оптимальних режимах імпульсного струму, визначений за допомогою тунельного мікроскопа, становив 20–30 нм.

В умовах малої частоти ІС при густині струму $i_{\text{сеп}} \geq 3 \text{ А/дм}^2$ тривалість імпульсу виявляється достатньою для досягання перехідного часу при граничній густині струму, що відображується в різкому змищенні потенціалу катода в період імпульсу у від'ємний бік ($E > 2 \text{ В}$). При збільшенні частоти до 330–350 потенціал імпульсу залишається близько 1 В, тобто граничної густини струму не можна досягти. Це дозволило збільшити робочу густину струму до

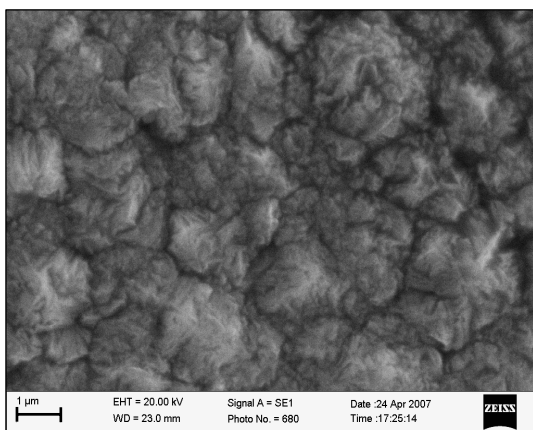


а

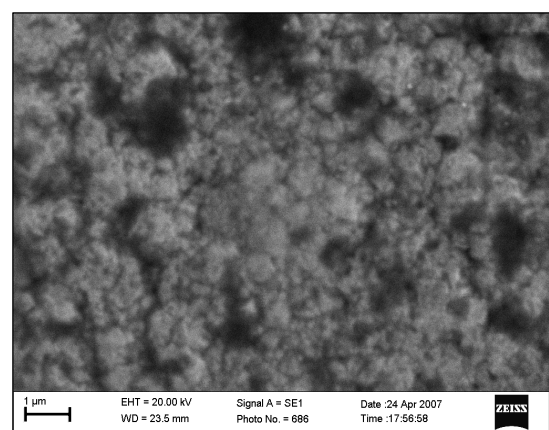


б

Рис. 3. Форма катодних імпульсів при густині струму 2 А/дм^2 і $\tau_{\text{ім}}/\tau_{\text{п}}$ (мс): а – 1/2; б – 10/100



а



б

Рис. 4. Фотографії нікелевих покриттів, осаджених при стаціонарному (а) та імпульсному (б) електролізі

Таблиця. Потенціали нікелю наприкінці періодів імпульсу і паузи

Середня густина струму, А/дм ²	Потенціал у режимі постійного струму	Потенціал в імпульсі/потенціал у паузі, В		
		$\tau_{\text{ім}} : \tau_{\text{п}} = 10:20$, мс	$\tau_{\text{ім}} : \tau_{\text{п}} = 1:2$, мс	$\tau_{\text{ім}} : \tau_{\text{п}} = 1:10$, мс
0,5	-0,84	-0,92/-0,64	-0,9/-0,73	-1,01/-0,66
1	-0,87	-0,98/-0,72	-0,98/-0,74	-1,1/-0,70
2	-0,92	-1,01/-0,75	-1,0/-0,74	-1,18/-0,71
3	-0,95	-1,18/-0,80	-1,05/-0,76	-1,55/-0,75
4	-0,99	-2,3/-1,1	-1,12/-0,78	-2,8/-1,15

3 А/дм² (20 °С) при нарощуванні 40 мкм нікелю. При 50 °С одержано блискучі осадки нікелю товщиною 400 мкм при густині струму 30 А/дм².

Висновки

Використання імпульсного струму дозволяє зменшити величину кристалів осажденного нікелю до нанорозмірів, одержувати блискучі покриття при відсутності блискоутворювача як у стандартних “гарячих”, так і в “холодних” електролітах та зменшити пористість покриттів. Оптимальні розміри співвідношення тривалостей паузи та імпульсу для формування блискучих покриттів з високим ВС становлять $\tau_{\text{п}}/\tau_{\text{ім}} = 2-5$ мс. При подальшому збільшенні

шпаруватості і зниженні частоти імпульсного струму ВС зменшується.

Визначені режими нестационарного електролізу є перспективними як для поліпшення якості гальванічних нікелевих покриттів, так і для нарощування товстих шарів нікелю в гальванопластиці. В останньому випадку постають задачі прискорення процесу та запобігання росту дендритів. Зважаючи на одержані в статті попередні дані про можливість збільшення робочої густини струму в десять разів при нагріванні електроліту, в подальшому доцільно буде проводити дослідження впливу параметрів нестационарного електролізу на морфологію і властивості товстошарових осадків, сформованих при 50–60 °С і середніх густинах струму 20–30 А/дм².

М.И. Донченко, Р.М. Редько, А.В. Нагорный,
Т.И. Мотронюк

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА НА ЭЛЕКТРО-
ОСАЖДЕНИЕ НИКЕЛЯ ИЗ СУЛЬФАМАТНЫХ
ЭЛЕКТРОЛИТОВ

Исследовано влияние параметров импульсного тока на морфологию покрытий и электрохимические характеристики процесса электроосаждения никеля из сульфаматных электролитов. Определены режимы электролиза, которые способствуют блескообразованию, уменьшению пористости покрытий и повышению выхода по току металла. Показано, что выход по току растёт при уменьшении скважности и увеличении частоты импульсного тока. Применение импульсов с большой скважностью приводит к образованию мелкодисперсных блестящих гладких осадков с величиной зерна 20–30 нм.

M.I. Donchenko, R.M. Redko, O.V. Nagornyj,
T.I. Motronuyk

THE INFLUENCE OF A PULSE CURRENT ON
NICKEL ELECTRODEPOSITION FROM SULFA-
MATE ELECTROLYTES

The paper under consideration describes the influence of pulse current parameters on morphology of coatings and electrochemical characteristics of nickel electrodeposition from sulfamate electrolytes. We determine the electrolyze regimes, promoting brightening and reduction of coverings porosity and increase of yield, following the metal current. We demonstrate that the yield, following the current, grows at the increase of on-off time ratio and frequency of a pulse current. The key assumption behind this paper is that the pulses application with a small on-off time ratio results in formation of the fine-grained brilliant smooth deposits with the grain size about 20–30 nanometers.

1. Садаков Г.А. Гальванопластика. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
2. Костин Н.А., Кублановский В.С., Заблудовский А.В. Импульсный электролиз. – К.: Наук. думка, 1989. – 168 с.
3. Смоляг Н.Л., Ганисевский В.В., Жарский И.М. Использование импульсного тока для нанесения железных покрытий // Тр. Белорус. гос. ун-та. Сер. 3. Химия и технол. неорг. веществ. – 2003. – № 11. – С. 68–80.
4. Елинек Т.В. Успехи гальванотехники. Обзор мировой литературы за 2003–2004 годы // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2006. – 14, № 2. – С. 10–16.
5. Вячеславов П.М., Волянюк Г.А. Электрохимическое формование. – Л.: Машиностроение, 1979. – 196 с.
6. Буткене Р.В., Моцкуте Д.В. Поведение сахараина, *n*-метилсахарина и *n*-этанолсахарина при электроосаждении покрытий сплавом никель-железо на обновляющихся катодах // Гальванотехника и обработка поверхности. – 1993. – 2, № 6. – С. 11–15.
7. Виноградов С.С. Экологически безопасное гальваническое производство / Под ред. В.Н. Кудрявцева. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Глобус, 2002. – 220 с.
8. Рыбалко А.В., Бобанова Ж.И. Катодные процессы в условиях подачи тока импульсами с крутыми передними фронтами // Гальванотехника и обработка поверхности. – 1993. – 2, № 5. – С. 13–15.
9. Пеганова Н.В., Цупак Т.Е. Электроосаждение никеля из разбавленного ацетатно-хлоридного электролита в импульсном режиме // Там же. – 2007. – 15, № 4. – С. 18–24.
10. Донченко М.І., Срібна О.Г., Редько Р.М. Роль побічних реакцій у процесах електроекстракції металів із стічних вод металообробних виробництв // Екологія і ресурсосбереження. – 2005. – № 3. – С. 25–30.

Рекомендована Радою
хіміко-технологічного факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
20 травня 2008 року

УДК 677:658:567

В.С. Палейчук, С.О. Бондаренко

ВИКОРИСТАННЯ ВОДОРОЗЧИННИХ ХІМІЧНИХ ВІДХОДІВ У ТЕХНОЛОГІЇ МАЙОЛІКИ**Вступ**

Керамічні шлікери, які використовуються в технології тонкокерамічних виробів, внаслідок надлишку поверхневої енергії на поверхні розділу фаз як колоїдно-хімічні системи є агрегативно і кінетично нестійкими, схильними до коагуляції та розшарування в об'ємі, який займає система, що призводить до погіршення технологічних параметрів глинистих технічних суспензій, зниження якості готової продукції і техніко-економічних показників роботи підприємства [1].

Альтернативою для дефіцитних лужних електролітів, які застосовуються в технології тонкокерамічних виробів для інтенсифікації процесу подрібнення спіснювальних компонентів шихти при мокрому помелі, забезпечення необхідного гранулометричного складу і технологічних параметрів керамічних шлікерів, є використання водорозчинних промислових відходів хімічного походження. Наявність у складі скидних промислових відходів комплексу хімічних сполук, що можуть як поліпшувати якість помелу, так і стабілізувати агрегативно нестійкі керамічні шлікери, покращуючи їх технологічні показники, дає змогу прогнозувати їх загальнополіпшувальну дію не тільки відносно формувальних мас, але й стосовно керамічних шлікерів та рекомендувати їх до використання в технології тонкокерамічних виробів [2, 3].

Таблиця 1. Хімічний склад вихідної сировини

Назва компонента	Масовий вміст оксидів, %								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	В.П.П.
Веселовська глина	51,4–53,8	27–35	1,1–1,5	1,1–1,5	0,73–0,7	0,73–0,6	1,15–0,66	2,0–2,32	9,0–9,2
Гранітний відсів	69,9	14,8	0,4	1,0	4,1	3,3	3,3	2,1	0,8
Бій віконного скла	71,6	2	–	0,08	6,7	4,1	14,6	0,5	–

Таблиця 2. Мінералогічний склад глини Веселовського родовища

Масовий вміст мінералів, %					
Каолініт	Гідрослюда	Монтморилоніт	Змішано-шарові утворення	Кварц	Інші мінерали
60–68	34–35	–	–	3–5	–

Постановка задачі

Дана стаття присвячена вивченню впливу відходів хімічного фрезерування алюмінію (ВХФА) ВАТ НПП “Більшовик” на реологічні властивості і реологічну поведінку в процесі лиття щодо керамічних шлікерів, які застосовуються в технології виробництва кераміки господарчо-побутового і художньо-декоративного призначення. Проведення реологічних досліджень висвітлює питання можливості використання ВХФА, зокрема, у виробництві майоліки, попит на яку має тенденцію до постійного зростання в умовах розвитку приватного підприємництва. До складу ВХФА входять поверхнево-активні речовини (ПАР) і лужні електроліти, які відіграють роль ефективних реагентів-стабілізаторів, диспергаторів та пептизаторів завдяки протіканню в системі при їх наявності сукупності колоїдно-хімічних процесів, а саме адсорбційних, іонообмінних, електроповерхневих та процесів міцелоутворення з молекул ПАР тощо. Такі реагенти спроможні замінити в технології господарчої кераміки дефіцитні лужні електроліти, які традиційно використовуються, поліпшити якість помелу і покращити технологічні параметри керамічних шлікерів. Крім того, наявність у складі ВХФА разом із лужними електролітами гідроксиду алюмінію і алюмінату натрію позитивно впливатиме як на самий процес випалу кераміки, так і на фізико-технічні показники якості готової продукції [4].

Матеріали та методи

Хімічний і мінералогічний склад вихідної сировини та основні властивості глини для виробництва майоліки наведено в табл. 1–3.

Таблиця 3. Основні технологічні властивості веселовської глини

Температурний інтервал спеченого стану, °С	Вогнетривкість, °С	Число пластичності, %	Вміст фракції частинок < 1 мкм, %
1100–1250	1510–1710	9,4–20,3	55,8–98,5

З метою визначення можливості використання ВХФА в технології кераміки господарчо-побутового і художньо-декоративного призначення для розрідження керамічних шлікерів було вивчено їх реологічну поведінку в хімічно-активному середовищі, створеному введенням реагенту. Для цього використовувався метод ротаційної віскозиметрії в широкому діапазоні напруг зсуву [6] з використанням ротаційного віскозиметра "РЕОТЕСТ-2". Вивчення реологічних властивостей керамічних шлікерів, оброблених ВХФА, супроводжувалося визначенням впливу реагенту на їх технологічні параметри і фільтраційні властивості [7]. Дослідження адсорбції з розчинів на поверхні глинистих частинок і вплив реагенту на поверхневий натяг глинистої фази із врахуванням складності хімічного складу реагенту здійснювались сталагмометрично [8]. ВХФА, який використовувався в роботі, є вмістом гальванічних ванн, взятих у розведенні 1:100 і прийнятих за відсоткову концентрацію хімічного реагенту. Діапазон оптимальних концентрацій ПАР і лужних електролітів, які сприяють підвищенню агрегативної стійкості керамічних шлікерів, обумовлено апріорі науково-технічною інформацією [9, 10].

Результати експерименту і їх обговорення

Особливості реологічної поведінки керамічних шлікерів, оброблених ВХФА в досліджуваному діапазоні концентрацій реагенту під дією дотичних напруг зсуву P , знаходять відо-

браження в ході реологічних кривих в'язкості $\eta = f(P)$ та течії $D_r = f(P)$ (рис. 1). Одержані експериментальні дані дали можливість розрахунково-графічним способом з кривих в'язкості $\eta = f(P)$ і течії $D_r = f(P)$ [6] визначити структурно-реологічні параметри керамічних шлікерів, які характеризують вплив ВХФА на міцнісні і в'язкісні властивості керамічних шлікерів (табл. 4).

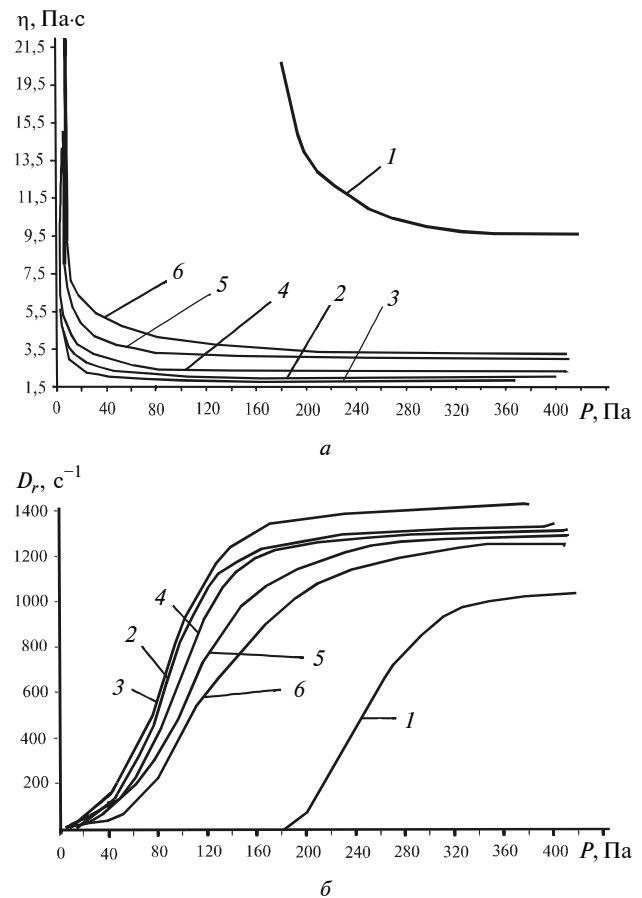


Рис. 1. Криві в'язкості (а) та течії (б) для керамічних шлікерів, оброблених ВХФА: 1 – вихідний шлікер; 2 – 0,25 % ВХФА; 3 – 0,5 % ВХФА; 4 – 1 % ВХФА; 5 – 1,5 % ВХФА; 6 – 2 % ВХФА

Таблиця 4. Вплив ВХФА на реологічні параметри керамічних шлікерів

Масовий вміст реагенту-домішки ВХФА, %	В'язкість шлікеру, Па·с				Межа текучості, Па		
	η_1	η_m^x	η_{ef}	$(\eta_1 - \eta_m^x)$	P_{k1}	P_{k2}	P_m
0	18,74	9,56	0,156	9,18	183,2	191,4	418
0,25	12,63	6,59	0,336	6,04	14,28	52,31	401,49
0,5	4,7	1,867	0,262	2,833	7,35	45,59	367,36
1	9,567	2,3	0,289	7,267	2,87	64,71	407,54
1,5	9,567	3,23	0,302	6,337	2,87	61,76	408
2	8	3,05	1,325	4,95	2,87	69,12	410,41

Згідно з результатами експерименту, хімічна обробка ВХФА сприяє розрідженню системи, що підтверджується зниженням міцнісних і в'язкісних структурно-реологічних параметрів керамічних шлікерів при введенні ВХФА, а саме величин умовно-статичної $P_{к1}$ і умовно-динамічної меж текучості $P_{к2}$, пластичної міцності P_m , найбільшої пластичної (шведівської) в'язкості η_1 практично незруйнованої структури при напругах зсуву, менших за умовно-статичну межу текучості $P_{к1}$, найменшої пластичної (бінгамівської) в'язкості η_m^x практично зруйнованої структури при напругах зсуву, більших за умовно-динамічну межу текучості $P_{к2}$, ефективної в'язкості $\eta_{еф}$ при $P_{к1} < P < P_{к2}$ і аномалії в'язкості ($\eta_1 - \eta_m^x$) як міри підвищення агрегативної стійкості керамічних шлікерів (див. табл. 4). Проведенням реологічних досліджень керамічних шлікерів, оброблених ВХФА, показано, що максимальна стабілізація керамічних шлікерів визначається мінімальними значеннями міцнісних і в'язкісних параметрів, одержаних введенням 0,5 %-ної концентрації реагенту, тобто такої концентрації ВХФА, яка відповідає ємності адсорбційного моношару на поверхні глинистої фази з молекул поверхнево-активного компонента та необхідна для формування моношару з рідкого дисперсійного середовища. Про це свідчать експериментальні дані з вивчення адсорбції з розчинів на поверхні твердої фази (рис. 2). Утворення адсорбційного шару з молекул ПАР на поверхні глинистих частинок відіграє роль структурно-механічного бар'єру, який, блокуючи активні коагуляційно-чутливі центри на твердій поверхні, перешкоджає коагуляційному зчепленню частинок дисперсної фази [11]. При цьому звільняється вільно зв'язана волога, іммобілізована в комірках коагуляційної структури, з розрідженням керамічного шлікеру. Завдяки вдалому поєднанню компонентів у ВХФА, зокрема наявності у складі реагенту поряд з ПАР лужних електролітів, одночасно створюється також електрокінетичний фактор стійкості, що робить свій внесок у протікання процесів пептизації і самодовільного диспергування агрегатів глинистих частинок, запобігання коагуляції в дисперсійній системі, забезпечення сталості та покращення технологічних параметрів керамічних шлікерів.

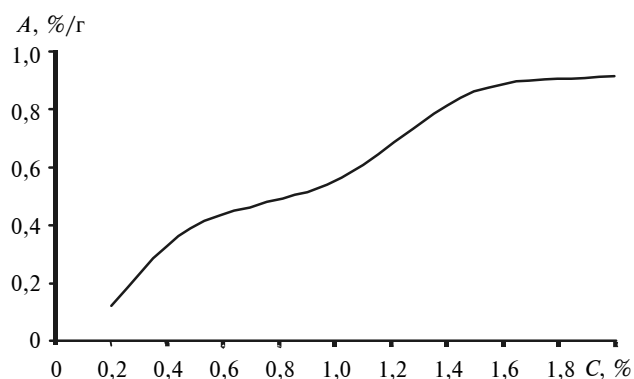


Рис. 2. Адсорбція з водних розчинів ВХФА на поверхні глинистої фракції

Розрідження керамічних шлікерів під впливом поверхнево-активних компонентів ВХФА, які відіграють роль "захисного" колоїду відносно глинистих частинок, а також лужних електролітів, сприяє збільшенню фільтраційної властивості керамічних шлікерів на 32,9%, про що свідчать дані рис. 3 і табл. 5 щодо швидкості набору відливки. Розрідження керамічних шлікерів під впливом адсорбційного модифікування ВХФА дає змогу знизити їх вологість порівняно з обробленими лише лужними електролітами на 1,3–1,5%. Це прогнозує економію енергетичних затрат у процесі сушіння тонкокерамічних напівфабрикатів.

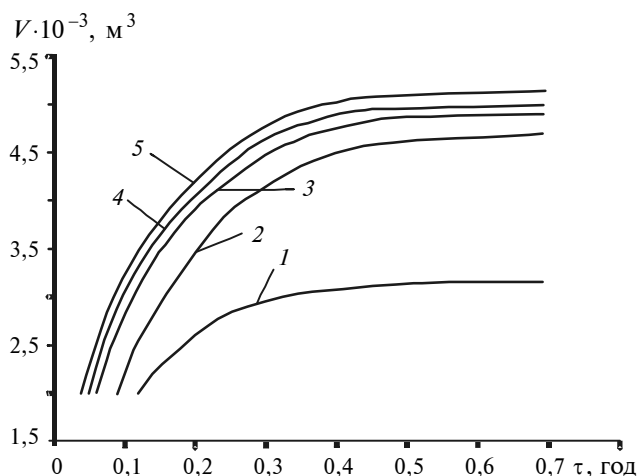


Рис. 3. Фільтраційна здатність керамічних шлікерів при наявності добавок ВХФА

Про зниження вологості при використанні в технології господарчо-побутової кераміки керамічних шлікерів, оброблених ВХФА, свідчать експериментальні дані з визначення залежності пластичної міцності P_m від вологості шлікеру, наведені на рис. 4.

Таблиця 5. Вплив ВХФА на технологічні параметри керамічних шлікерів (T – текучість; K_3 – коефіцієнт загущення; V – швидкість набору тіла відливки)

Масовий вміст реагенту-домішки ВХФА, %	Технологічні параметри шлікеру		
	T , с	K_3 , с ⁻¹	$V \cdot 10^3$, г/(см ² ·с)
0	14,16	16,37	1,06
0,5	10,5	10,38	1,36
1	9,78	10,03	1,59
1,5	8,91	9,14	1,63
2	7,47	8,8	1,68
2,5	8,77	9,23	1,69

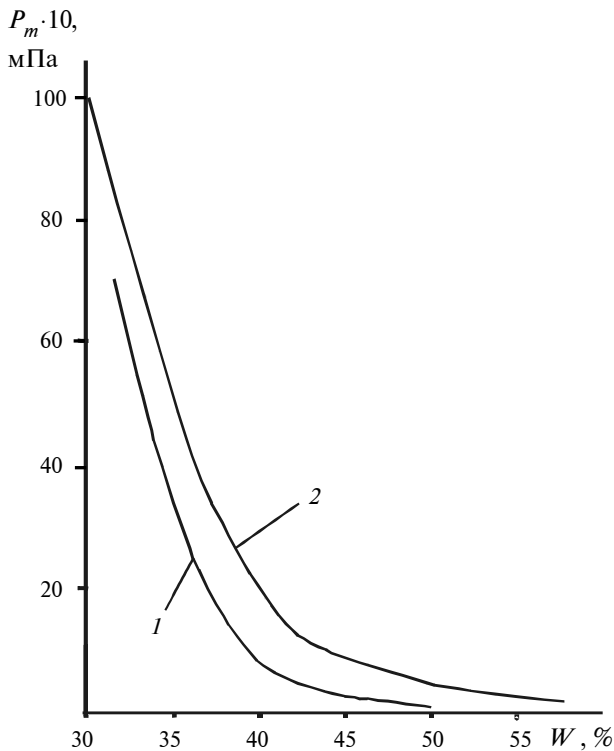


Рис. 4. Пластична міцність шлікеру до (2) та після (1) його обробки ВХФА

Подальше збільшення концентрації реагенту призводить до загущення керамічного шлікеру, що ілюструється зростанням всіх його міцнісних та в'язкісних реологічних параметрів. Зміцнення просторового коагуляційно-тиксотропного каркасу з частинок глинистої фази в керамічному шлікері пов'язане з протіканням у системі процесів міцелоутворення за участю молекул ПАР. Це підтверджується даними з вивчення об'ємних властивостей водного розчину ВХФА (рис. 5), на підставі яких встановлено критичну концентрацію міцелоутворення (ККМ) для ВХФА, що становить 1 % (об'єм-

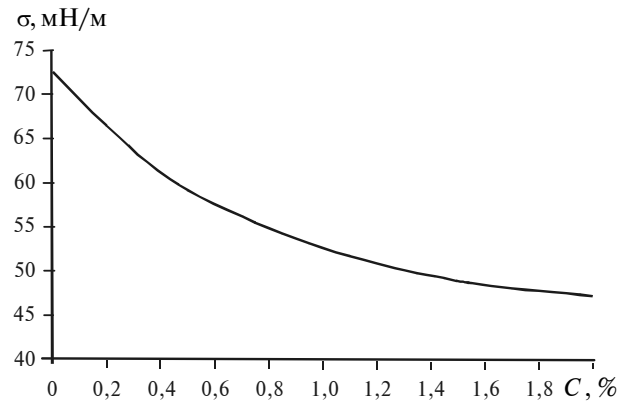


Рис. 5. Об'ємні властивості водного розчину ВХФА

ний). Протікання процесів міцелоутворення у ВХФА як на поверхні дисперсної фази, так і в рідкому дисперсійному середовищі сприяє зростанню кінетичних одиниць колоїдного ступеня дисперсності в одиниці об'єму. Це зумовлює збільшення кількості контактів між частинками дисперсної фази, і загалом, енергії коагуляційного зчеплення, що призводить до зміцнення просторового коагуляційно-тиксотропного каркасу в керамічному шлікері. Ілюстрацією цього є збільшення структурно-реологічних міцнісних і в'язкісних параметрів системи, що свідчить про втрату нею агрегативної стійкості (див. табл. 4). Дійсно, аналіз даних з вивчення адсорбційних процесів, що протікають у керамічному шлікері, обробленому ВХФА (див. рис. 2), свідчить про появу полішарів з молекул адсорбату (ПАР) в області ККМ та при концентраціях реагенту, вищих за ККМ, здатних зміцнювати просторовий коагуляційний каркас за рахунок виникнення додаткових зв'язків між частинками дисперсної фази з утворенням "змішаної" коагуляційної структури підвищеної міцності при наявності як глинистих частинок, так і міцел з молекул ПАР.

Дані, одержані при вивченні структурно-реологічних властивостей керамічних шлікерів, оброблених ВХФА, корелюють з результатами вивчення впливу хімічно-активного середовища, створеного введенням ВХФА, на технологічні параметри керамічних шлікерів (див. табл. 5). Відповідно до наведених експериментальних даних при обробці шлікеру рекомендованими концентраціями ВХФА (0,5 %) збільшується текучість керамічного шлікеру в 1,74 раза, зростає швидкість набору тіла відливки на 25,8 %, зменшується коефіцієнт загущення шлікеру – в 1,6 раза.

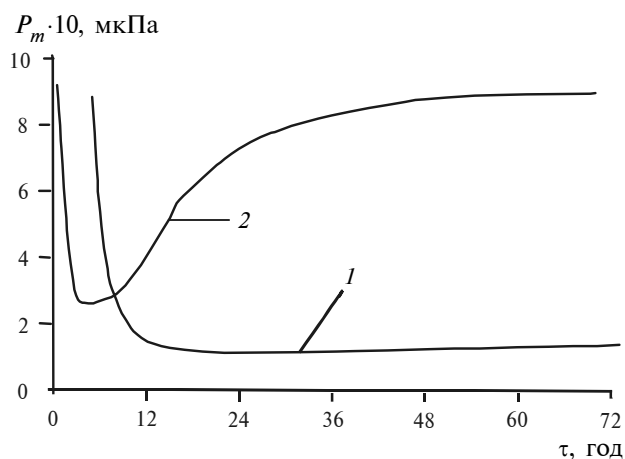


Рис. 6. Кінетика загустіння керамічних шлікерів до (2) та після (1) обробки ВХФА

Ефективність стабілізації керамічних шлікерів за рахунок створення хімічно-активного середовища за допомогою ВХФА (0,5 %) доведено результатами вивчення кінетики загустіння керамічних шлікерів (рис. 6). Згідно з одержаними експериментальними даними стандартний набір лужних електролітів (соди кальцинованої, рідкого скла, триполіфосфату натрію), який використовується в технології тонкокерамічних виробів, забезпечує сталість пластичної міцності керамічного шлікеру на малий відрізок часу (12 год) з подальшою його коагуляцією на відміну від ВХФА, які при введенні в керамічну масу, істотно зменшуючи пластичну міцність шлікеру (на 12,12 %), забезпечують сталість його реологічних та технологічних параметрів на весь час проведення експерименту (96 год).

Висновки

Створення хімічно-активного середовища в керамічних шлікерах введенням водорозчинних ВХФА запобігає протіканню коагуляційних процесів у системі, що знаходить відображення

в поліпшенні реологічних параметрів керамічних шлікерів, підвищенні їх фільтраційних властивостей на 32,9 %, зменшенні коефіцієнта загустіння в 1,6 раза, збільшенні текучості на 25,8 % та швидкості набору черепка на 28,4 %, що демонструє розріджувальний ефект ВХФА відносно керамічних шлікерів.

Експериментально доведено, що розрідження керамічних шлікерів дає змогу знизити кількість води водозатворення на 1,3–1,5 %, зменшуючи водоспоживання в технології кераміки декоративного призначення.

Вивченням кінетики зміцнення керамічних шлікерів, хімічно оброблених ВХФА, доведено, що створення хімічно-активного середовища в системі стабілізує реологічні параметри керамічних шлікерів, запобігає об'ємному розшаруванню останніх і зберігає стабільність технологічних параметрів технічних суспензій на стадії шлікерного лиття. Це сприяє оптимізації процесу шлікерного лиття в технології тонкокерамічних виробів.

За результатами проведених експериментальних досліджень (беручи до уваги зменшення водоспоживання в проведенні масогазових операцій у технології кераміки з використанням шлікерного лиття) передбачається зниження енерговитрат у процесі сушіння, що сприятиме створенню ресурсо- і енергозберігаючої технології у виробництві, зокрема кераміки господарчо-побутового та художньо-декоративного призначення.

Зважаючи на наявність у ВХФА лужних електролітів і ПАВ, доцільно вивчити вплив ВХФА на всі стадії технологічного процесу, в тому числі й на процеси сушіння та випалу і насамперед на вплив ВХФА на фізико-механічні та експлуатаційні властивості випалених виробів із врахуванням безперервності технологічного процесу при одночасній дискретності окремих його стадій з метою оптимізації всього технологічного процесу виробництва та поліпшення якості кінцевої продукції.

В.С. Палейчук, С.А. Бондаренко

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДОРАСТВОРИМЫХ ХИМИЧЕСКИХ ОТХОДОВ В ТЕХНОЛОГИИ МАЙОЛИКИ

Методом ротационной вискозиметрии изучено влияние отходов химического фрезерования алюминия (ОХФА) на реологическое поведение кера-

V.S. Paleychuk, S.O. Bondarenko

THE USAGE OF SOLUBLE CHEMICAL SIFTINGS IN THE TECHNOLOGY OF MAJOLICA

Employing the method of rotary viscosimetry, we study the influence of siftings of chemical alumina milling (SCAM) on the rheological behaviour of ceramic slip in the dynamic conditions, modeling ope-

мических шликеров в динамических условиях, моделирующих процессы шликерного литья в технологии керамики декоративного назначения. Установлено, что химическая обработка ОХФА оказывает антикоагуляционное действие по отношению к керамическим шликерам, что находит отражение в уменьшении их реологических параметров и проявлении разжижающего эффекта. На основании проведенных экспериментальных исследований дано физико-химическое обоснование относительно диапазона рекомендуемых концентраций ОХФА (0,5–0,75 %), обеспечивающих улучшение технологических параметров керамических шликеров. Изучена кинетика упрочнения (загустевания) керамических шликеров в статических условиях. Установлено, что химическая обработка ОХФА, повышая агрегативную и кинетическую устойчивость керамических шликеров, предупреждает их расслоение в объеме, обеспечивает стабильность реологических параметров в процессе шликерного литья.

rations of slip casting in processing of ornamental ceramics.

Through experiments performed, we determine that chemical treatment of SCAM causes an anticoagulation influence on ceramic slip, decreasing its rheological characteristics and development of fluxing effect.

According to the experimental surveys, we propose the physico-chemical substantiation of the recommended concentration range of SCAM (0,5–0,75 %), providing the enhancement of process variables of ceramics slip.

Furthermore, we study the kinetics of ceramics slip setting (thickening) in the static conditions. Specifically, we determine that the chemical treatment of SCAM (increasing aggregate and kinetics stability of ceramics slips), prevents their livering, protecting the stability of rheological characteristics in the process of slip casting.

1. Мороз И.И. Фарфор, фаянс, майолика. – К.: Техника, 1985. – 352 с.
2. Палейчук В.С., Крупа А.А., Вакуленко Т.А. Регулирование реологических свойств фарфоровых шликеров химическими отходами // Экотехнология и ресурсосбережение. – 1995. – Вып. 2. – С. 58–61.
3. Палейчук В.С., Крупа А.А., Вакуленко Т.А. Влияние химических отходов на разжижение и фильтрационные свойства керамических шликеров // Там же. – 1996. – Вып. 3. – С. 58–61.
4. Шутько А.П., Шабанов М.В., Бутченко Л.И. Повышение качества строительных материалов введением в сырьевую массу раствора алюмината натрия // Там же. – 1995. – Вып. 2. – С. 62–63.
5. Строительная керамика. Справочник / Под ред. Е.Л. Рохваргера. – М.: Стройиздат, 1976. – 494 с.
6. Овчинников П.Ф., Круглицкий Н.Н., Михайлов Н.В. Реология тиксотропных систем. – К.: Наук. думка, 1972. – 120 с.
7. Методы исследования и контроля в производстве фарфора и фаянса / Под ред. А.И. Августинника, И.Л. Юрчака. – М.: Легкая индустрия, 1971. – 432 с.
8. Базелин С.А. Практикум по физической и коллоидной химии. – М.: Просвещение, 1972. – 292 с.
9. Овчаренко Ф.Д., Ничипоренко С.П., Круглицкий Н.Н., Третинник В.Ю. Исследования в области физико-химической механики дисперсий глинистых минералов. – К.: Наук. думка, 1965. – 178 с.
10. Пиевский А.И., Голубчикова В.В., Готкис А.И. К вопросу о влиянии добавок ПАВ на реологические свойства системы глина–вода // Теплофизика и теплотехника. – 1970. – № 8. – С. 114–117.
11. Круглицкий Н.Н. Физико-химические основы регулирования свойств дисперсий глинистых минералов. – К.: Наук. думка, 1968. – 320 с.

УДК 666.9 (075.8)

А.П. Паславська, В.П. Сербін, О.В. Булана

ГІДРАТАЦІЙНА АКТИВНІСТЬ СУМІСНО РОЗМЕЛЕНИХ ВАПНЯНО-ВАПНЯКОВИХ СУМІШЕЙ**Вступ**

Характерною ознакою сучасної і наступної промислово-технологічної епохи має стати не надпотужне добувне і високотемпературне енергозатратне технологічне озброєння, а ощадливе природно-ресурсне користування, випуск високоякісної продукції за безвідходними енергоощадливими технологіями, які мають забезпечити сталій екологічно-безпечний розвиток держави.

Відомо, що проблема відходів має не тільки природоохоронний аспект. Як правило, відходи є цінним матеріальним, а врешті, і матеріально-технічним ресурсом, і те, що ці ресурси не використовуються, свідчить про відсталість застосовуваних технологій, неефективність діючого економічного механізму у сфері природокоштування і охорони довкілля, а також про відсутність певних наукових напрацювань.

Другим напрямом енергоощадливого господарювання є раціональне використання промислової продукції, особливо тих матеріалів, виробництво яких потребує високих температур і чималої кількості палива, наприклад вапно, цемент.

Світове споживання вапна має тенденцію до зростання, оскільки, крім традиційних галузей виробництва сталі, кольорових металів, будівельної індустрії, сільського господарства, хімічних та інших виробництв, його все більше використовують для вирішення екологічних проблем, пов'язаних із десульфуризацією газових викидів та з переробкою твердих відходів.

Як показує світова практика, понад 70 % щорічно утворюваних твердих мінеральних відходів можна переводити у вторинний сировинний ресурс або переробляти в активні в'язучі речовини. В активні матеріали тверді відходи переробляють найчастіше механічним диспергуванням, використовуючи різні домішки.

Добрий результат дає поєднання процесів механічного диспергування і змішування – сумісне розмелювання кількох компонентів і домішок, бо при тонкому сумісному розмелю-

ванні можливі механохімічна активація компонентів, їх взаємодія і в результаті – підвищення реакційної здатності суміші [1–3].

Сумісним розмелюванням твердих відходів із грудковим вапном – напівфабрикатом виробництва вапняного в'язучого – можна значно знизити витрати на одержання тонкодисперсних однорідних та активних матеріалів. Зниження витрат пов'язане з тим, що немає необхідності як висушувати тверді вологі відходи, так і гасити вапно. Негашене вапно при сумісному подрібненні відбирає адсорбовану вологу, загашуючись при цьому і виділяючи значну кількість хімічної енергії. Слід зауважити, що розмелюваність самого негашеного вапна без мінеральних домішок ускладнюється через агрегування і налипання його подрібнених частинок на стінки та інші частини млина, чого не спостерігається при правильному поєднанні компонентів для сумісного з вапном помелу.

Постановка задачі

Метою даного дослідження є вивчення взаємодії вапняку з вапном у процесі розмелювання, визначення основних чинників, які впливають на сумісне розмелювання компонентів, а також вивчення впливу цих чинників на гідратаційну активність вапняно-вапнякових сумішей.

Об'єкти і методи дослідження

Предметом дослідження є процес розмелювання відходів вапняку – дрібного залишку від класифікованої для випалу в шахтних печах породи з продуктом випалу – грудковим вапном, а також склад і в'язучі властивості розмелених сумішей.

Сумісне розмелювання проводилось за однаковим режимом у фарфоровому млині, завантаженому на 45 % уралітовими кульками і еквівалентною масою вапняку та вапна, подрібнених на шебінь розміром 5–10 мм. Співвідношення компонентів і вологість вапняку змінювались. Розмелюваність оцінювалась за величиною маси часткових залишків на ситах 02 і 008 через кожні 60 хв помелу.

У дослідженнях використовувалось грудкове вапно активністю 78,8 % (серія 1) і активністю 69,7 % (серія 2). В обох серіях використовувались вапно кальцієве, яке швидко гаситься, і вапняк, складений кальцитом (рис. 1, крива 1).

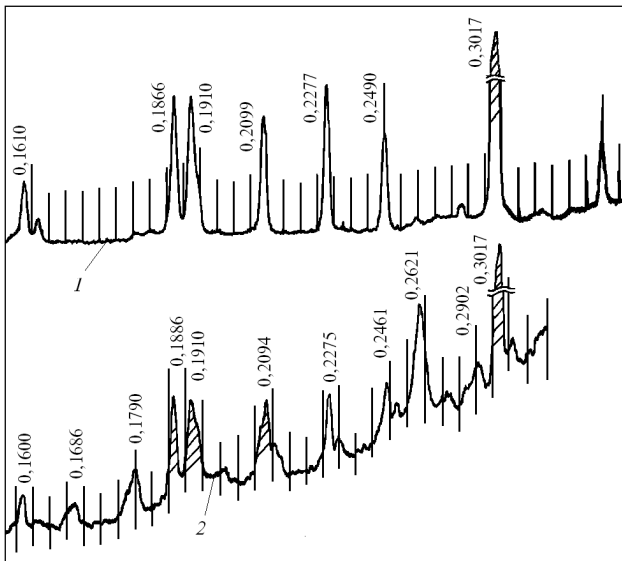


Рис 1. Рентгенограми вапняку (1) і суміші (2)

Консистенція формувального тіста (нормальна густина) визначалась за Сутгардом, строки тужавіння – приладом Віка (ДСТУ Б В.2.7-82–99). Для визначення змін об’єму і міцності на стискання формувались кубики 1,41×1,41×1,41 см, які тверднули на повітрі при кімнатній температурі протягом двох годин у формі і двадцяти чотирьох годин – без форми.

Експериментальна частина

Результати, одержані при вивченні кінетики розмелювання вапняно-вапнякових сумішей, наведено на рис. 2. Вони свідчать, що найбільший вплив на сумісну розмелюваність вапняку

і вапна має вологість вапняку. Кількість адсорбованої вапняком води впливає на гасіння вапна, а отже, й на режим розмелювання. Якщо вологість вапняку така, що забезпечує не часткове, а повне гасіння активної частини вапна, то суміш, налипаючи на кулі і стінки млина, не мелеться (це – суміш 4 (серія 1) і суміш 2 (серія 2)).

Другий за значущістю впливу чинник – це співвідношення вапняку і вапна при сумісному розмелюванні. Від кількості вапна, що гаситься, залежить кількість утворюваної хімічної енергії, яка впливає на умови помелу. Звичайно, негашене вапно має менший зовнішній об’єм, ніж гідратне, і в процесі гасіння диспергується, але разом з ним помітно активніше диспергується й інша складова суміші – вапняк. Суміш 4 серії 2 за однакових зовнішніх умов помелу розмелюється в півтора рази швидше від суміші 3 і у два рази швидше порівняно з сумішшю 1.

Третім чинником, що впливає на тонкість помелу суміші, є тривалість розмелювання. Як свідчать результати експерименту, цей чинник також залежить від співвідношення компонентів та вологості вапняку і тому має визначатися для кожного заданого співвідношення $\text{CaCO}_3 : \text{CaO} : \text{H}_2\text{O}$. Заданими мають бути також маси грубих і тонких фракцій у суміші.

Всі розмелені суміші проявляють гідралічну активність, мають короткі строки тужавіння і утворюють досить міцні тверді структури, що не властиво окремо ні вапняку, ні вапну. Міцність затверділих зразків тим більша, чим тонше розмелена суміш (таблиця).

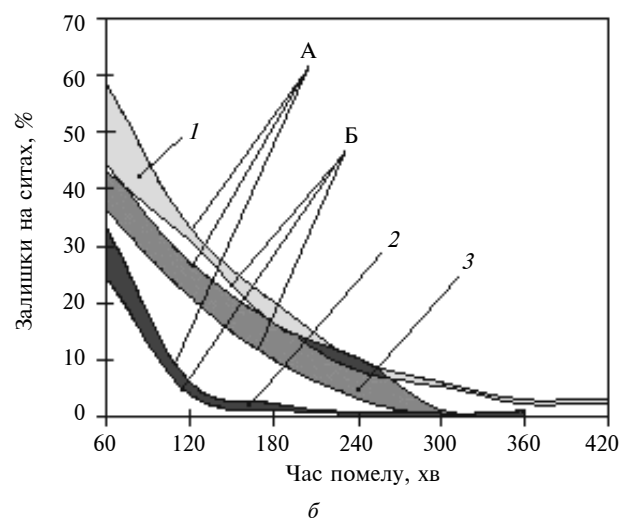
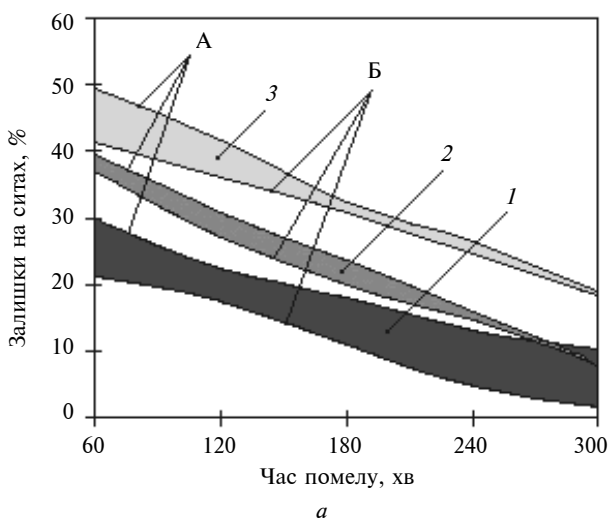


Рис. 2. Залишки на ситах 02 (криві А) і 008 (криві Б) при розмелюванні сумішей: а – серія 1; б – серія 2. Склад сумішей наведено в таблиці

Таблиця. В'язучі властивості вапняно-вапнякових сумішей

Серія	№ суміші	Склад суміші			Нормальна густина, %	Строки тужавіння, хв		Міцність на стиск, МПа
		CaCO ₃ :CaO	Вологість вапняку, %	Погашеність CaO, %		Початок	Кінець	
1	1	1,45:1	6,53	36	16	20,5	23	1,5
	2	1,27:1	20,9	82	16	16,1	18,5	1,5
	3	2,8:1	6,8	55	16	15,0	17,3	1,5
	4	2,26:1	23,54	100	Налипання			
2	1	1,87:1	0	0	30	8	10,5	2,3
	2	1,54:1	20,7	100	Налипання			
	3	1,87:1	9,4	50	24	10,5	14	2,6
	4	1,63:1	14,8	75	25	11	15	4,6

Рентгенофазові аналізи сумішей 1, 2, 4 серії 2 показують повну ідентичність їх кристалічних складових фаз і відсутність як негашеного (CaO), так і гідратованого (Ca(OH)₂) вапна. Натомість, у суміші, крім кальциту ($d/n = 0,3017; 0,2481; 0,2094; 0,1910; 0,1856; 0,1600; 0,1438$ нм), який був у вихідному вапняку, фіксуються нові кристалічні фази: μ -ваттеріт ($d/n = 0,29029; 0,2275; 0,1790$ нм) і CaCO₃ – арагоніт ($d/n = 0,2621; 0,2309; 0,1686$ нм). Високий рівень фону свідчить про наявність рентгеноаморфних фаз (див. рис. 1, крива 2). Звідси випливає, що за умов, створених у млині, монотропний поліморфний перехід арагоніту в кальцит став енантіотропним. Можливість реалізації переходу кальцит \rightarrow арагоніт під впливом механічної дії і створення зони стабільного існування арагоніту пояснюється явищами позиційного розупорядкування, що зумовлюють утворення дефектної кристалічної ґратки [4] і підвищують хімічну активність дисперсій. Відмінність в'язучих властивостей утворених розмелюванням сумішей (таблиця) при ідентичному складі їх кристалічних фаз і однакової дисперсності можна пояснити наявністю рентгеноаморфних сполук.

Зараз із розвитком виробництва сухих сумішей сформувався стійкий попит на карбонатну муку – компонент гіпсових оздоблювальних матеріалів [3, 5]. У зв'язку з цим заслуговує на особливу увагу встановлений нами факт, що в композиціях з гіпсом-півгідратом добавка вапняно-вапнякової активної суміші підвищує міцність гіпсового каменя в два з половиною – три рази без уповільнення термінів тужавіння.

Висновки

Сумісна розмелюваність вологого вапняку і вапна істотно залежить від співвідношення CaCO₃:CaO:H₂O. У процесі сумісного розмелювання утворюється суміш, в складі якої, крім початково наявного стабільного кальциту, ідентифіковані й новоутворені метастабільні форми CaCO₃ (μ -ваттеріт, арагоніт) і відсутні кристалічні CaO і Ca(OH)₂, але є рентгеноаморфні сполуки. Суміш має короткі терміни тужавіння, а розмелена до залишку на ситі 008 \leq 1% при співвідношенні CaCO₃:CaO=1,63 і погашеності 75% CaO твердне з утворенням каменя міцністю 4,6 МПа.

Короткі терміни тужавіння і гідратаційна активність суміші вказують на відмінність її властивостей від властивостей як вапняку (він не твердне), так і вапна (воно не має регульованих строків тужавіння). Встановлено доцільність використання вапняно-вапнякових дисперсій у складі в'язучих композицій, а властивості цих композицій будуть предметом подальших наших досліджень.

Виконане дослідження націлене на вдосконалення технологій будівельних матеріалів, розширення асортименту в'язучих та композиційних матеріалів і пропонується не тільки для обговорення наукової спільноті, а і сучасному бізнесу для оцінювання і аналізу щодо зниження вартості будматеріалів, структурної перебудови їх виробництв.

А.П. Паславская, В.П. Сербин, О.В. Буланая

ГИДРАТАЦИОННАЯ АКТИВНОСТЬ СОВМЕСТНО
РАЗМЕЛЕННЫХ ИЗВЕСТКОВО-ИЗВЕСТНЯКОВЫХ
СМЕСЕЙ

Определены основные факторы, оказывающие влияние на совместную размалываемость влажного известняка и извести, исследованы гидратационная активность и состав известково-известняковых смесей.

A.P. Paslavskaya, V.P. Serbin, O.V. Bulana

THE GRINDABILITY AND HYDRATION ACTIVITY
OF LIME-LIMESTONE MIXTURES

In this paper, we consider the main factors of influence of humid limestone and lime on combined grindability. Furthermore, we study the hydration activity and lime-limestone mixture composition.

1. *Пащенко А.А., Сербин В.П., Старчевская Е.А.* Вяжущие материалы. – К.: Вища шк., 1985. – 438 с.
2. *Бутт Ю.М., Сычов М.М., Тимашев В.В.* Химическая технология вяжущих материалов. – М.: Высш. шк., 1980. – 438 с.
3. *Карапузов Е.К., Герольд Х., Толмачев Н.Г.* Сухие строительные смеси. – К.: Техника, 2000. – 230 с.
4. *Горшков В.С., Савельев В.Г., Федоров Н.Ф.* Физическая химия силикатов и других тугоплавких соединений. – М.: Высш. шк., 1988. – 400 с.
5. *ГОСТ 14050–93.* Мука известняковая (доломитовая). Технические условия.

Рекомендована Радою
хіміко-технологічного факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
13 червня 2008 року

УДК 544.2:519.8

С.О. Примиська, Ю.О. Безносик,
Г.О. Статюха, В.П. Решетіловський**ДОСЛІДЖЕННЯ І МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ АДСОРБЦІЇ/ДЕСОРБЦІЇ ОКСИДІВ АЗОТУ НА ЦЕОЛІТАХ****Вступ**

Неухильне збільшення витрати палива як у самій енергетиці, так і в різних галузях промисловості і на транспорті приводить до зростання об'єму шкідливих речовин, що надходять в атмосферу. Рівень забрудненості міст значно перевищує допустимі норми за рахунок вихлопних газів автомобільного транспорту. На сьогодні промислові установки з очищення димових газів діють в Японії, Німеччині, США [1]. В Україні ж не на одній з ТЕС не проводиться глибоке очищення газових викидів і, тим більше, не здійснюється на практиці очищення вихлопних газів автотранспорту. Такий процес очищення може ґрунтуватися на адсорбційному, абсорбційному і каталітичному методах [2, 3]. Найбільш ефективним і економічним інструментом знешкодження забруднювальних речовин до рівня гранично допустимих концентрацій є адсорбційні методи [4, 5].

Постановка задачі

Адсорбційні процеси піддаються найбільш складному математичному опису внаслідок великого різноманіття кінетичних факторів, що супроводжують дифузію сорбату в макро-, мезо- і мікропорах сорбенту і необхідністю врахування специфічних характеристик як самого сорбенту (наприклад, склад і властивості активних центрів, умови регенерації), так і особливостей взаємодії в конкретній системі адсорбент–адсорбат і на стадії адсорбції, і на стадії регенерації. У зв'язку з цим становить інтерес розробка математичної моделі динаміки адсорбції/десорбції оксидів азоту на цеолітах.

Експериментальне дослідження

Адсорбційний матеріал. Цеоліти, що містять значну кількість катіонів, здатні ефективно і селективно вилучати різні іони з газів, забезпечувати їх концентрацію. Цеоліти адсорбують лише ті молекули, критичний діаметр яких відповідає розмірам каналів структур каркаса. Дрібні розміри каналів зумовлюють здатність цеолітів до різко вираженої вибіркової адсорбції. Для оцінки можливості адсорбції молекул цеолітами використовують газокінетичний діаметр, зумовлений молекулярними властивостями речовин. Вибіркова адсорбція на цеолітах можлива і тоді, коли молекули всіх

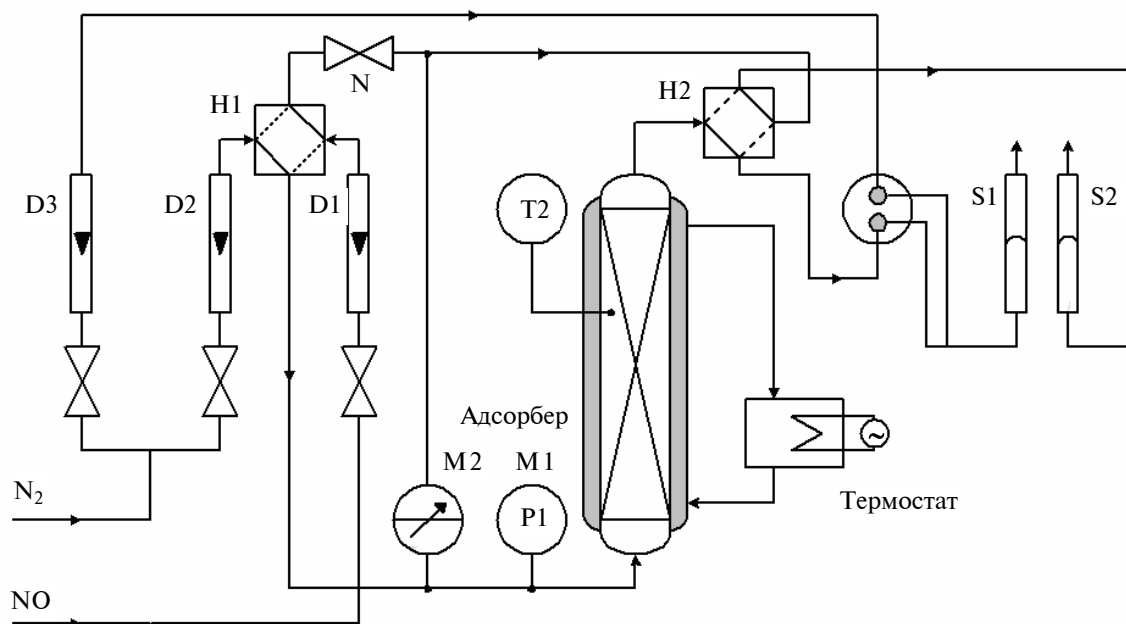


Рис. 1. Схематичне зображення експериментального устаткування: D1–D3 – витратоміри; S1, S2 – вимірювачі витрати потоку мильних пазирів; H1, H2 – крани; T1 – термометр; M1, M2 – манометри; N – голчастий вентиль

компонентів суміші досить малі і вільно проникають в адсорбційний простір. За інших умов обмінні катіони є адсорбційними центрами і визначають специфіку взаємодії при адсорбції на цеолітах молекул різної будови та електронної структури. Змінюючи природу та розмір обмінного катіона, можна підсилити чи послабити енергію адсорбції. Крім взаємодії з позитивним зарядом катіонів, молекула адсорбату отримує сильний дисперсійний вплив з боку інших атомів, що утворюють стінки каналів цеоліту. Одне з важливих питань адсорбційної взаємодії на цеолітах – з'ясування природи активних центрів. Так, для видалення оксидів азоту доцільно використовувати синтетичні цеоліти X-типу: 13X та LiLSX (виробництва Süd-Chemie Zeolites GmbH) [6, 7].

Експериментальне устаткування. Гази NO, N₂ в процесах адсорбції/десорбції подавали на вхід адсорбера (скляний реактор довжиною 360 мм та внутрішнім діаметром 12 мм), завантаженого цеолітом масою 35 г. Протягом одного експерименту температуру в адсорбері підтримували постійною. Поворотом крана Н1 здійснювали перехід між адсорбцією/десорбцією. Значення витрати газу встановлювали на витратомірах D1, D2 відповідно для процесу адсорбції/десорбції, за допомогою вимірювачів S1, S2 здійснювали її калібрування. Значення концентрації оксидів азоту в адсорбері протягом експерименту визначали за допомогою мас-спектрометра, підключеного до установки (рис. 1).

Результати експериментального дослідження

Експериментальне дослідження проводили при постійній температурі та витраті газу протягом одного експерименту. Відповідно для кожного наступного експерименту встановлювали нове значення температури (298, 303, ..., 323 °С) та витрати газу ($5 \cdot 10^{-3}$ м³/год, $10 \cdot 10^{-3}$ м³/год, $15 \cdot 10^{-3}$ м³/год). Відносну концентрацію оксидів азоту отримували за показаннями мас-спектрометра кожні дві секунди.

На рис. 2–5 спостерігаємо зменшення часу насичення адсорбенту та зменшення кута нахилу характеристичних кривих при збільшенні температури та витраті газу, тобто процес адсорбції/десорбції прискорюється при збільшенні температури та витраті газу. При зростанні температури більше за 308 °С процес прискорюється незначно, тому оптимальною температурою проведення даного процесу можна

вважати 303–308 °С. Характеристичні криві мають прямокутну форму за рахунок того, що адсорбційне поле в цеолітах поширюється на весь внутрішній об'єм. Розміри мікропор становлять всього кілька молекулярних діаметрів, в результаті чого потенціальні поля протилежних стінок перекриваються. Кут нахилу адсорбційної та десорбційної гілки майже одна-

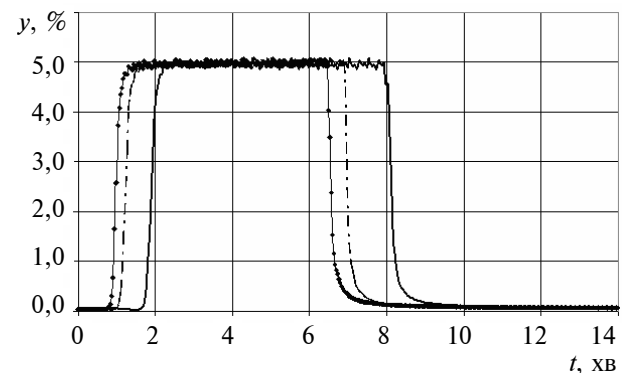


Рис. 2. Залежність концентрації NO в адсорбері з часом на цеоліті 13X при зміні температури, К: — — — — 298; — — — — 308; —◆— — 318

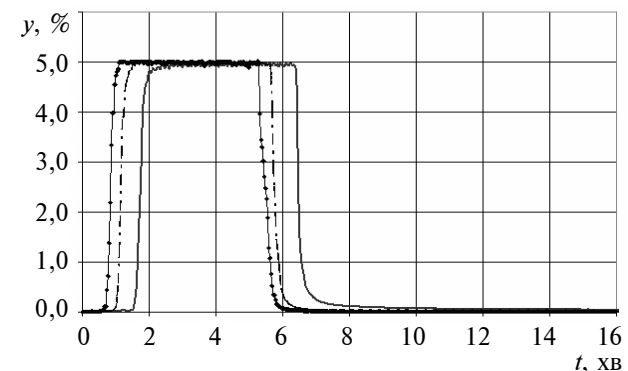


Рис. 3. Залежність концентрації NO в адсорбері з часом на цеоліті LiLSX при зміні температури, К: — — — — 298; — — — — 308; —◆— — 318

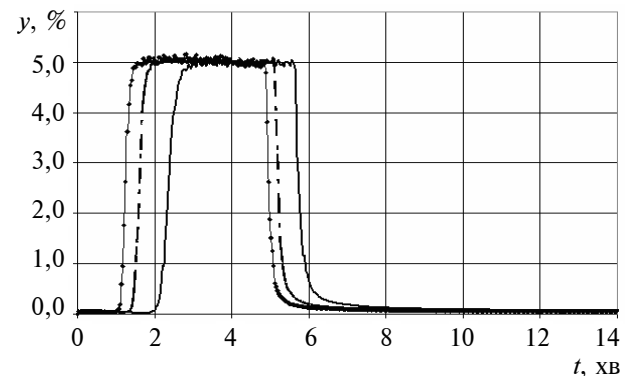


Рис. 4. Залежність концентрації NO в адсорбері з часом на цеоліті 13X при зміні витрати газу, м³/год: — — — — $5 \cdot 10^{-3}$; — — — — $10 \cdot 10^{-3}$; —◆— — $15 \cdot 10^{-3}$

ковий, що підтверджує зворотність процесу адсорбції/десорбції на цеолітах. Також із наведених рисунків видно, що поглинання оксидів азоту адсорбентом майже 100 % (значення $y = 5\%$ відповідає 100 %-му поглинанню адсорбату).

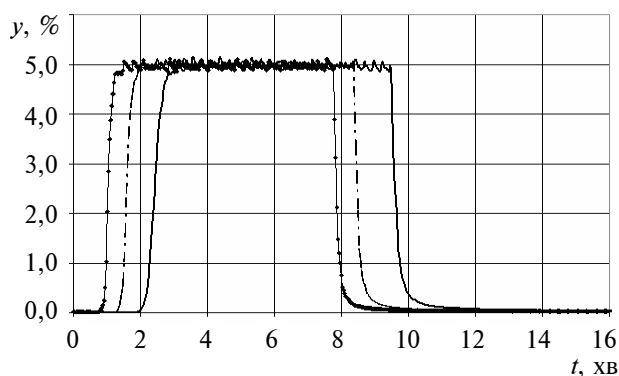


Рис. 5. Залежність концентрації NO в адсорбері з часом на цеоліті LiLSX при зміні витрати газу, м³/год: — — — 5·10⁻³; - - - 10·10⁻³; —◆— 15·10⁻³

Моделювання

Математичне моделювання досліджуваних процесів – важливий інструмент у розробці та впровадженні нового технологічного обладнання за рахунок зменшення економічних та енергетичних витрат при проведенні процесу за оптимальних умов.

Для побудови ефективної математичної моделі необхідно: ретельно проаналізувати реальний об'єкт, процес чи систему; виділити найбільш істотні характеристики та властивості; визначити змінні (параметри, значення яких впливають на характер протікання процесу); описати залежність основних властивостей об'єкта, процесу від значень змінних за допомогою математичних співвідношень [8, 9].

Для математичного опису процесу адсорбції оксидів азоту на цеолітах запропоновано математичну модель, побудовану на основі рівнянь матеріального балансу i -го шару по твердій і газовій фазах (1, 2) [4] з використанням рівняння для розрахунку поглинальної здатності адсорбенту [10] в припущенні, що процес адсорбції/десорбції – ізотермічний, залежність ступеня адсорбції від молярної частки компонента є лінійна, дифузія речовин незначна, газовий потік через усі канали однаковий, дезактивація адсорбенту під час експерименту відсутня.

Ступінь адсорбції визначали за рівнянням, виведеним для диференціального реактора [11]:

$$r_i = \frac{F(y_{\text{вх}} - y_{\text{вих}})P_t}{RTw}, \quad (1)$$

де r_i – ступінь адсорбції, кмоль/(с·кг); F – об'ємна витрата газу, м³/год; R – газова стала, Па·м³/(кмоль·кг); M_{NO} – молярна маса NO, кг/моль; T – температура, К; $y_{\text{вх}} = P_{\text{вх}}/P_t$, $y_{\text{вих}} = P_{\text{вих}}/P_t$ – вхідна і вихідна молярні частки адсорбату; $P_{\text{вх}}$, $P_{\text{вих}}$ – парціальний тиск адсорбату на вході і виході, Па; P_t – загальний тиск, Па; w – маса адсорбенту, кг.

Насадку було поділено на N шарів і прийнято, що розподіл молярної частки (концентрації) NO по довжині шару лінійний, звідси матеріальний баланс на i -му шарі має вигляд:

по газовій фазі

$$\frac{dy_{\text{вих}i}}{dt} = \frac{2RT}{\varepsilon V_i P_t} \left\{ \frac{FP_t}{RT} (y_{\text{вх}i} - y_{\text{вих}i}) - k \bar{y}_i \theta_{V,i} q_0 w_i \right\}; \quad (2)$$

по твердій фазі

$$\theta_{V,i} = y_{\text{вх}i} \frac{dF}{dt} \frac{P_t M_{\text{NO}}}{RT} \left(t_{\text{н}} - \sum_0^{t_i \leq t_{\text{н}}} \frac{\bar{y}_i}{y_{\text{вх}i}} dt \right), \quad (3)$$

де $\bar{y}_i = (y_{\text{вх}i} - y_{\text{вих}i})/2$ – середня молярна частка газу на i -му шарі; k – константа адсорбції, с⁻¹; $\theta_v = (q_0 - q)/q_0$ – адсорбційна здатність; q – кількість адсорбованого NO на одиницю маси адсорбенту, кмоль/кг; q_0 – поглинена кількість адсорбованого NO на одиницю маси адсорбенту, кмоль/кг; $t_{\text{н}}$ – час насичення адсорбенту, год; V – об'єм насадки, м³; w – маса насадки, кг; N – кількість шарів; $V_i = V/N$ – об'єм шару, м³; $w_i = w/N$ – маса шару, кг.

При початкових умовах

$$t = 0, y_{\text{вих}i}(0) = 0, \theta_{V,i}(0) = 1 \quad (4)$$

і при врахуванні прийнятих вище припущень математична модель набуде вигляду

$$\frac{dy_{\text{вих}i}}{dt} = \frac{2RT}{\varepsilon V_i P_t} \left[\frac{FP_t}{RT} (y_{\text{вх}i} - y_{\text{вих}i}) - k \bar{y}_i \theta_{V,i} q_0 w_i \right], \quad (5)$$

$$\theta_{V,i} = y_{\text{вх}i} \frac{dF}{dt} \frac{P_t M_{\text{NO}}}{RT} \left(t_{\text{н}} - \sum_0^{t_i \leq t_{\text{н}}} \frac{\bar{y}_i}{y_{\text{вх}i}} dt \right).$$

Порівняння експериментальних даних з даними, отриманими за моделлю

Адекватність моделі даним, отриманим у результаті проведення експериментів (рис. 6, 7), здійснювали за критерієм Кохрена, розрахо-

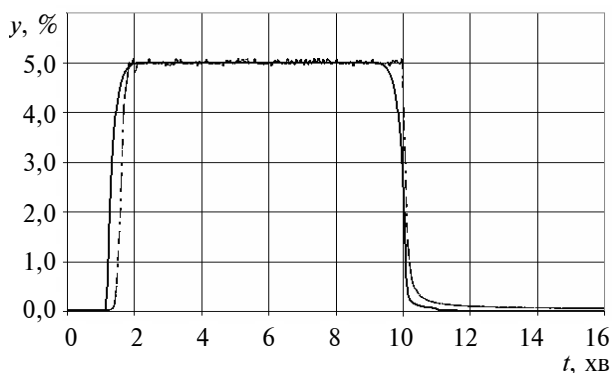


Рис. 6. Залежність концентрації NO в адсорбері з часом при температурі 298 К і витраті газового потоку $10 \cdot 10^{-3}$ м³/год на цеоліті 13X: — — — експеримент; ————— модель

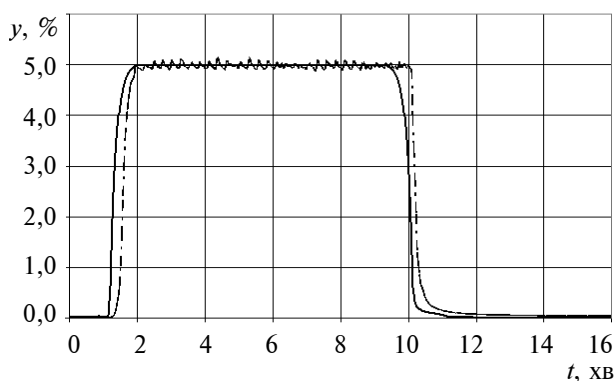


Рис. 7. Залежність концентрації NO в адсорбері з часом при температурі 298 К і витраті газового потоку $10 \cdot 10^{-3}$ м³/год на цеоліті LiLSX: — — — експеримент; ————— модель

ване значення якого виявилось значно менше теоретичного (для цеоліту 13 X $G_p = 0,07665 < G_T(0,05, 1, 60) = 0,1737$, для цеоліту LiLSX $G_p = 0,07616 < G_T(0,05, 1, 60) = 0,1737$). Таким чином, запропонована модель адекватно описує динаміку процесу адсорбції/десорбції монооксиду азоту на цеоліті і її можна використовувати при удосконаленні та розробці нового обладнання очищення газів від шкідливих речовин.

Висновки

В останні роки ми особливо гостро відчули, що немає нічого важливішого для суспільства, ніж здорове навколишнє середовище. Наукове дослідження очищення повітряного шару від шкідливих речовин – складна й цікава діяльність. Математичні методи в ній дають можливість одержати практично важливі результати, уникнути значних труднощів і витрат при проведенні експериментів у реальному житті. Так, в результаті дослідження було визначено, що процес адсорбції/десорбції оксидів азоту ефективно протікає на синтетичних цеолітах X-типу (досягається майже 100 %-го поглинання оксидів азоту адсорбентом), та отримано оптимальні умови проведення процесу: температура 298 К, витрата газу – максимальна. Модель адекватно описує досліджуваний процес і її можна використати на практиці при розробці й удосконаленні устаткування для очищення відкидних газів. Даний метод і модель є перспективними методами очистки відкидних газів від оксидів азоту за рахунок 100 %-ного видалення шкідливих речовин при мінімальних енергетичних та економічних витратах.

С.А. Примиская, Ю.А. Безносик, Г.А. Статюха,
В.П. Решетиловский

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АДсорбЦИИ/ДЕсорбЦИИ оксидов азота на цеолитах

Представлены результаты экспериментальных исследований процесса адсорбции/десорбции оксидов азота из газового потока на синтетическом цеолите X-типа. Получено, что поглощающая способность исследуемого цеолита составляет 100 %, что свидетельствует о полном удалении

S.O. Prymyska, Yu.O. Beznosyk, G.O. Statyukha,
V.P. Reshetilowski

RESEARCHING AND DESIGNING OF PROCESSES ADSORPTION/DESORPTION OF NITROGEN OXIDES ON THE ZEOLITES

The paper under study reports on the research results of the adsorption/desorption process of nitrogen oxides from a gas stream on the synthetic zeolites of X-type. We demonstrate the adsorption ability of the probed zeolites is 100 %, which testifies the complete removal of nitrogen oxides from a gas

окислов азота из газового потока. Приведена математическая модель исследуемого процесса, определены оптимальные условия и параметры процесса и доказана ее адекватность. Полученные результаты показывают целесообразность применения метода и его математического описания на практике.

stream. We present the mathematical model of the probed process, determine the process' optimum terms and parameters and illustrate the model's adequacy. The research results demonstrate the mathematical description and appropriateness of practical application of the proposed method.

1. *Матрос Ю.Ш., Носков А.С., Чумаченко В.А.* Каталитическое обезвреживание отходящих газов промышленных производств. – Новосибирск: Наука, 1991. – 224 с.
2. *Сигал И.Я., Славин В.И., Шило В.В.* Очистка промышленных выбросов в атмосферу от оксидов серы и азота: Обзор мирового опыта работы по очистке дымовых газов в 80–90-е годы. – Харьков: РИП “Оригинал”, 1995. – 144 с.
3. *Толмачев А.М., Трубников О.И., Годовиков И.А., Кузнецова Т.А.* Банк данных по адсорбции. Физико-химические характеристики адсорбции паров на цеолитах // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. – 2001. – 42, № 4. – С. 247–251.
4. *Примиська С.О., Статюха Г.О., Безносик Ю.О., Решетилівський В.П.* Комп’ютерне моделювання адсорбційних процесів очистки газів від оксидів азоту на цеолітах // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2007. – № 3. – С. 144–149.
5. *Despres J., Koebel M., Krocher O., Elsener M. et al.* Adsorption and desorption of NO and NO₂ on Cu-ZSM-5 // Microporous and Mesoporous Materials. – 2003. – N 58. – P. 175–183.
6. *Брек Д.* Цеолитовые молекулярные сита. – М.: Мир, 1976. – 782 с.
7. *Химия цеолитов и катализ на цеолитах / Под ред. Дж. Рабо.* – М.: Мир, 1980. – Т. 1. – 506 с.; Т. 2. – 422 с.
8. *Машутин В.Ю.* Квантово-химическое моделирование адсорбции и каталитической конверсии монооксидов углерода и азота на гидроксидах и оксидах меди, купратах скандия, иттрия и лантана: Автореф. дис. ... канд. хим. наук. – Новомосковск, 2005. – 85 с.
9. *Александровичев И.П.* Кинетические модели адсорбции и десорбции одноатомного газа поверхностью твердых тел: Автореф. дис. ... канд. хим. наук. – Екатеринбург, 1996. – 76 с.
10. *Reschetilowski W.* Technisch-Chemisches Praktikum. – WILEY-VCH Verlag GmbH. – 2002. – P. 120–131.
11. *Fujita S., Terunuma H., Nakamura M.* Mechanisms of Methanation of CO and CO₂ over Ni // Ind. Eng. Chem. Res. – 1991. – P. 1146–1151.

Рекомендована Радою
інженерно-хімічного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
12 червня 2008 року

УДК 541.8

Г.А. Рудницька, Т.А. Каменська,
І.О. Ренський**ЗВ'ЯЗОК МІЖ ПАРАМЕТРАМИ РІВНЯННЯ
КІНЕТИЧНОГО КОМПЕНСАЦІЙНОГО ЕФЕК-
ТУ В ТЕРМОДИНАМІЦІ АКТИВАЦІЇ В'ЯЗ-
КОЇ ТЕЧІЇ РІДИН І СТРУКТУРОЮ РОЗЧИ-
НІВ****Вступ**

Природа кінетичного компенсаційного ефекту, що спостерігається в термодинаміці активації в'язкої течії рідин і описується рівнянням

$$\Delta H_{\eta}^{\ddagger} = A + B\Delta S_{\eta}^{\ddagger}, \quad (1)$$

детально аналізувалась М.І. Шапароновим [1]. Параметр B в рівнянні (1), названий ізокінетичною температурою, в теорії в'язкої течії рідин Шапаронова є коливальною температурою реакційного центра активованого комплексу. Крім цього, вельми абстрактного, визначення коефіцієнта B ізокінетичної залежності (1) ніяких інших тлумачень його змісту в літературі не зустрічалось. Про зміст коефіцієнта A взагалі немає ніяких відомостей. Слід зазначити, що в науковій періодиці зовсім не розглядалось питання про зв'язок між значеннями A і B з іншими активаційними параметрами в'язкої течії і з властивостями, що віддзеркалюють структуру рідкого середовища.

Раніше ми виявили наявність концентраційного компенсаційного ефекту в ряді водних розчинів йодидів лужних металів [2] і хлориду калію [3]. У статті [3] було показано, що в серії однотипових об'єктів (гомологи одного ряду, розчини солей різних концентрацій) параметри рівняння (1) є координатами точки перетину політерм енергії Гіббса активації в'язкості $\Delta G_{\eta}^{\ddagger}$, обчисленої за рівнянням теорії перехідного стану Ейрінга для в'язкої течії [4]:

$$\eta = \frac{N_A h}{\chi V_M} \exp\left(\frac{\Delta G_{\eta}^{\ddagger}}{RT}\right), \quad (2)$$

де N_A – число Авогадро; η – динамічна в'язкість, мПа·с; V_M – молярний об'єм рідини, см³/моль; R – універсальна газова стала.

З даних статті [3] випливає, що значення ізокінетичної температури B в серії однотипових об'єктів не залежить від трансмісійного коефіцієнта χ , який входить у вираз для обчислення $\Delta G_{\eta}^{\ddagger}$, а параметр A є функцією цієї властивості.

Постановка задачі

Для подальшого вивчення активаційних характеристик в'язкої течії рідин у межах теорії Ейрінга [4] та з'ясування природи компенсаційного ефекту ми поставили собі за мету проаналізувати характер зміни параметрів A і B рівняння (1) в концентраційних серіях водних розчинів галогенідів лужних металів та порівняти ці закономірності із зміною деяких структурозалежних властивостей даних рідких систем.

Об'єкти і методи дослідження

Для розв'язання поставленої задачі, крім частково вивчених раніше термодинамічних характеристик активації в'язкої течії водних розчинів йодидів лужних металів [2], використано також дані про активаційні параметри в'язкості розчинів деяких хлоридів та бромідів цих металів.

Енергію Гіббса активації в'язкої течії було обчислено за рівнянням (2). Враховуючи значення констант в одиницях СІ, які входять до цього рівняння, та покладаючи $\chi = 1$, рівняння (2) записуємо у вигляді

$$\Delta G_{\eta}^{\ddagger} = RT(\ln \eta + \ln V_M + 0,9187). \quad (3)$$

Ентропію активації в'язкості $\Delta S_{\eta}^{\ddagger}$ було обчислено диференціюванням по температурі апроксимаційних поліномів другого степеня $\Delta G_{\eta}^{\ddagger} = f(T)$, одержаних в інтервалі температур 283,15–363,15 К, за відомим співвідношенням

$$\Delta S_{\eta}^{\ddagger} = -\partial \Delta G_{\eta}^{\ddagger} / \partial T.$$

Ентальпія активації $\Delta H_{\eta}^{\ddagger}$ обчислювалась за рівнянням

$$\Delta H_{\eta}^{\ddagger} = \Delta G_{\eta}^{\ddagger} + T\Delta S_{\eta}^{\ddagger}.$$

Значення густини і в'язкості взято з [5].

Параметри A і B лінійної залежності (1) було одержано при $T = 298,15$ К для концентраційних серій водних розчинів галогенідів лужних металів, що містять 0–0,05 молярних часток солі.

Значення істинного трансмісійного коефіцієнта χ в рівнянні (2) визначалось на основі теорії Шахпаронова [1] із співвідношення

$$R \ln \chi = -A/B.$$

Експериментальна частина

В табл. 1 і 2 наведено ентальпії і ентропії активації в'язкої течії води та водних розчинів деяких галогенідів лужних металів, обчислених при температурі 298,15 К.

Дані табл. 1 і 2 свідчать про те, що і в ряді йодидів, і в ряді хлоридів ентальпія і ентропія активації в'язкої течії зменшуються як при зростанні концентрації солі в розчині, так і при збільшенні радіуса катіона лужного металу. В обох випадках така поведінка термодинамічних характеристик активації в'язкості пояснюється впливом розчиненої солі на структуру води, а отже, й на структуру розчину в цілому. Очевидно, що чим більша концентрація електроліту в розчині, тим істотнішим є ефект руйнування асоційованої структури води. Крім

того, чим більший однозарядний катіон, тим менше він гідратується. Відомо [4], що руйнування структури води поблизу таких іонів, зумовлене деполімеризацією молекул розчинника під дією електричних полів, які створюють ці іони, призводить до зниження в'язкості розчинів, внаслідок чого активаційні параметри процесу в'язкої течії також зменшуються.

Значення параметрів A і B рівняння (1), одержані внаслідок лінійної апроксимації залежностей $\Delta H_{\eta}^{\ddagger} = f(\Delta S_{\eta}^{\ddagger})$ за даними табл. 1 та 2, наведено в табл. 3. У цій таблиці також наведено коефіцієнти кореляції R даних лінійних залежностей, значення істинних трансмісійних коефіцієнтів χ , граничні молярні електропровідності розчинів λ_0 , граничні коефіцієнти дифузії D_0 [6], а також коефіцієнти B рівняння в'язкості розчинів електролітів Джонса–Дола [4].

З даних, наведених у табл. 3, видно, що характер зміни ізокінетичної температури B і коефіцієнта A рівняння (1) в концентраційних рядах солей відповідає закономірній зміні всіх інших властивостей, кожна з яких більшою чи меншою мірою пов'язана із структурою розчинів. Вважається [1], що чим менше значення χ , тим більш структурованою є рідина. Також

Таблиця 1. Термодинамічні характеристики активації в'язкої течії водних розчинів йодидів лужних металів

Молярна частка солі	$\Delta H_{\eta}^{\ddagger}$, кДж/моль				$\Delta S_{\eta}^{\ddagger}$, Дж/(моль·К)			
	LiI	NaI	KI	CsI	LiI	NaI	KI	CsI
0	16,8				25,8			
0,01	16,3	16,0	15,3	15,0	23,5	22,9	20,9	20,1
0,02	16,0	15,2	14,5	13,6	22,4	20,1	18,3	15,5
0,03	15,8	14,6	13,9	12,2	21,3	17,9	16,2	11,1
0,04	15,5	14,2	13,3	11,4	20,0	16,1	14,4	8,2
0,05	15,3	14,0	12,9	—	18,8	15,1	12,8	—

Таблиця 2. Термодинамічні характеристики активації в'язкої течії водних розчинів хлоридів лужних металів та бромиду калію

Молярна частка солі	$\Delta H_{\eta}^{\ddagger}$, кДж/моль				$\Delta S_{\eta}^{\ddagger}$, Дж/(моль·К)			
	NaCl	KCl	CsCl	KBr	NaCl	KCl	CsCl	KBr
0	16,8				25,8			
0,01	16,4	15,7	15,5	15,4	24,1	21,7	21,3	21,2
0,02	16,0	15,0	14,9	14,6	22,5	19,4	19,3	18,5
0,03	15,9	14,4	14,2	14,0	22,0	17,3	17,2	16,1
0,04	15,7	13,9	13,7	13,5	21,2	15,6	15,4	14,6
0,05	15,6	13,5	13,3	13,1	20,6	14,2	14,1	13,4

Таблиця 3. Параметри A , B , електропровідності λ_0 та коефіцієнти R , χ , D_0 , B при температурі 298,15 К для водних розчинів галогенідів лужних металів

Сіль	A , Дж/моль	B , К	R	$\chi \cdot 10^2$	λ_0 , $\frac{\text{См} \cdot \text{см}^2}{\text{моль}}$	$D_0 \cdot 10^9$, $\text{м}^2/\text{с}$	B , л/моль
LiI	11180	217	0,9985	0,20	115,4	1,37	0,081
NaCl	10740	235	0,9993	0,41	126,5	1,61	0,079
NaI	9930	265	0,9988	1,1	126,9	1,62	0,018
KCl	9450	285	0,9998	1,8	149,9	1,99	-0,014
KBr	9170	295	0,9998	2,4	151,6	2,02	-0,048
CsCl	9070	300	0,9997	2,6	153,6	2,04	-0,052
KI	8990	302	0,9998	2,8	150,3	2,00	-0,075
CsI	8830	308	0,9998	3,2	154,0	2,05	-0,114

відомо [4], що додатні значення коефіцієнта B рівняння Джонса–Дола свідчать про впорядкованість структури розчину завдяки іон-дипольній взаємодії, а від'ємні – про руйнування структури рідкого середовища внаслідок взаємодії молекул розчинника з іонами розчиненої солі. Граничні молярні електропровідності і граничні коефіцієнти дифузії електролітів у водних розчинах безпосередньо пов'язані із швидкостями руху іонів. Останні, в свою чергу, залежать від розмірів заряджених частинок у гідратованому стані, тобто, в решті-решт, від інтенсивності взаємодії іонів із молекулами води.

З даних табл. 3 також випливає, що характер зміни всіх структурозалежних властивостей розчинів – трансмісійного коефіцієнта, граничної молярної електропровідності, коефіцієнтів дифузії та коефіцієнта B рівняння Джонса–Дола – свідчить про ослаблення структури водних розчинів в ряді наведених у таблиці солей. Враховуючи те, що ізокінетична температура B в цьому ряді закономірно зростає, а параметр A рівняння (1), навпаки, зменшується, можна зробити висновок, що їх зміна також віддзеркалює цю тенденцію. Отже, наве-

дені коефіцієнти рівняння компенсаційного ефекту (1) можуть бути критеріями ступеня упорядкованості рідкої системи принаймні в серіях однотипових розчинів на основі спільного розчинника.

Висновки

Порівняльний аналіз характеру зміни деяких структурозалежних властивостей водних розчинів галогенідів лужних металів та коефіцієнтів рівняння компенсаційного ефекту в термодинаміці активації в'язкої течії рідин показав, що параметри A і B рівняння (1) закономірно змінюються внаслідок ослаблення структури розчину. Звідси випливає, що зазначені параметри можна використовувати як критерії при оцінюванні структурованості водних розчинів електролітів.

Для підтвердження цього висновку є доцільним подальше вивчення термодинамічних характеристик активації в'язкої течії водних розчинів солей з багатозарядними іонами, а також дослідження рідких систем на основі неводних розчинників.

А.А. Рудницкая, Т.А. Каменская, И.А. Ренский

СВЯЗЬ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ УРАВНЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКОГО КОМПЕНСАЦИОННОГО ЭФФЕКТА В ТЕРМОДИНАМИКЕ АКТИВАЦИИ ВЯЗКОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ И СТРУКТУРОЙ РАСТВОРОВ

Проанализирована связь между коэффициентами A и B уравнения $\Delta H_{\eta}^{\ddagger} = \Delta G_{\eta}^{\ddagger} + T\Delta S_{\eta}^{\ddagger}$, кото-

A.A. Rudnitskaya, T.A. Kamensk'ka, I.O. Renskii

RELATION BETWEEN THE PARAMETERS OF THE COMPENSATION EFFECT EQUATION IN THE ACTIVATION THERMODYNAMICS OF LIQUIDS VISCOUS FLOW AND SOLUTION STRUCTURE

This paper shows the relation between the A and B coefficients of equation $\Delta H_{\eta}^{\ddagger} = \Delta G_{\eta}^{\ddagger} + T\Delta S_{\eta}^{\ddagger}$,

рое описывает компенсационный эффект в термодинамике активации вязкого течения жидкостей Эринга, и некоторыми, зависящими от структуры ионсодержащих растворов, свойствами, такими, как предельная молярная электропроводность, предельный коэффициент диффузии, коэффициент B уравнения вязкости растворов электролитов Джонса–Дола. Показано, что в ряду водных растворов галогенидов щелочных металлов по мере ослабления их структуры параметр A закономерно уменьшается, а постоянная B , напротив, растет, на основании чего можно утверждать, что коэффициенты A и B уравнения компенсационного эффекта могут быть использованы в качестве критериев при оценке степени структурированности водных электролитных растворов.

describing the compensation effect for liquids viscous flow in the activation thermodynamics of Eyring, and highlighting some structural properties of ion-containing solutions, such as limit molar conductivity, limit coefficient diffusion and B constant of Jones-Dole equation for electrolytes solutions. We show that the A parameter steadily decreases, while the B constant increases in the series of aqueous solutions of halogen salt alkaline metals with weakening of their structure. We can conclude that the A and B coefficients in the compensation effect equation can be used as criteria of evaluation of the degree of structuredness of electrolyte solutions.

1. Шахпаронов М.И. Механизмы быстрых процессов в жидкостях / Михаил Иванович Шахпаронов. – М.: Высш. шк., 1980. – 352 с.
2. Ренский И.А., Рудницкая А.А., Фиалков Ю.Я. Термодинамические характеристики активации вязкого течения водных растворов йодидов щелочных металлов // Журн. физ. химии. – 2003. – 77, № 2. – С. 370–372.
3. Рудницка Г.А., Ренський І.О., Каменська Т.А. Про компенсаційний ефект у термодинаміці активації
4. Эрдеи-Груз Т. Явления переноса в водных растворах / Пер. с англ. Н.С. Лидоренко, Ю.А. Мазитова. – М.: Мир, 1976. – 592 с.
5. Зайцев И.Д. Физико-химические свойства бинарных и многокомпонентных растворов неорганических веществ. – М.: Химия, 1988. – 416 с.
6. Робинсон Р., Стокс Р. Растворы электролитов / Пер. с англ. А. Н. Фрумкина. – М.: ИЛ, 1963. – 648 с.

Рекомендована Радою
хіміко-технологічного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
16 травня 2008 року

УДК 667:64, 667:6

В.А. Свідерський, О.В. Миронюк

ВПЛИВ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ СУМІСНОСТІ РОЗЧИННИКА І ПЛІВКОУТВОРЮЮЧОГО ПОЛІМЕРУ НА ЗАХИСНІ ВЛАСТИВОСТІ ЛАКОФАРБОВОГО ПОКРИТТЯ

Вступ

Однією з головних функцій лакофарбового покриття є захист поверхні матеріалу, що укривається від руйнуючої дії середовища. Цей захист може здійснюватися за різними механізмами – від підсиленої ізолюючої дії (бар'єрний ефект) до введення до складу покриття речовин, що поглинають руйнуючі агенти зовнішнього середовища. На даний час корозія металів конструкцій, машин та механізмів є особливим фактором, що завдає відчутних збитків державному та світовому господарству. Для захисту від корозії використовують низку методів, з яких нанесення лакофарбових покриттів посідає одне з найголовніших місць. Такий захист є дешевшим і більш вживаним, ніж модифікація поверхні металу пасивуючими металічними покриттями або введення до його складу легуючих добавок.

Ізолюючий ефект покриття досягається використанням плівкоутворювачів з підвищеними бар'єрними характеристиками [1], використанням бар'єрних наповнювачів [2,3] та за допомогою керованого регулювання взаємодії між компонентами лакофарбового матеріалу.

Питання залежності властивостей полімерних композитів від термодинамічної сумісності полімеру з розчинником розглядалося в статті [4]. Ця характеристика впливає на структуру захисного покриття, а отже, і на його бар'єрні властивості.

Постановка задачі

Метою даної статті є формулювання критерію вибору розчинника відповідно до його термодинамічної сумісності з полімерною основою покриття з метою оптимізації ізоляційних властивостей захисного композиту.

Об'єкти дослідження

У даній статті досліджуються системи на основі бутілметакрилатного полімеру, який

знайшов широке використання як плівкоутворююча складова для захисних покриттів на сталі. Для досягнення мети дослідження було використано ряд розчинників, які було вибрано зважаючи на їх термодинамічні характеристики, зокрема значення енергії когезії δ . Вибрані розчинники розрізняються за цим параметром в широкому діапазоні, що дає можливість скласти досить повну картину залежності бар'єрних властивостей захисного покриття від їх природи.

Методи дослідження

Для визначення термодинамічної сумісності був застосований метод встановлення в'язкості розведених розчинів полімерів [5]. Перевагу цьому методу над методом набухання було віддано на основі того, що даний полімер є незшитим. Як розчинники використовувалися найбільш поширені в лакофарбовій промисловості розчинники плівкоутворювачів.

Для визначення координат центра розчинності згідно з теорією Гільденбранда–Скечарда використовувався метод осадження, описаний у [6]. Цим же методом із застосуванням осаджувачів було знайдено термодинамічні межі розчинності полімеру.

Бар'єрні властивості плівок оцінювалися за значеннями сорбції водяної пари, водопоглинання та ємнісно-омічним методом [7]. Дослідження проводилося на частоті змінного струму 10 кГц в середовищі електроліту – 3 %-ного (за масою) розчину NaCl.

Дослідження термодинамічної сумісності в системі полімер–розчинник

Для визначення параметра термодинамічної сумісності розчинника з полімером β була визначена залежність коефіцієнта збільшення характеристичної в'язкості K розведених розчинів від відомих значень густини енергії когезії δ :

$$K = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0}, \quad (1)$$

де η – в'язкість 5 %-ного (за масою) розчину полімера; η_0 – в'язкість розчинника.

Результати досліджень наведено в табл. 1.

Збільшення в'язкості розчину полімеру порівняно з чистим розчинником спричиняється взаємодією між молекулами цих речовин, зумовленою як вандерваальсівськими силами, так і взаємодією за водневими зв'язками. Тер-

модинамічно добрий розчинник за рахунок осмотичних сил викликає розгортання макромолекул у розчині, що призводить до зростання характеристичної в'язкості останнього. Термодинамічно поганий розчинник переводить молекули в розчин у згорнутому вигляді. В цьому випадку в'язкість розчину змінюється несуттєво відносно чистого розчинника. У даному випадку найкращим розчинником є бензол, його коефіцієнт K дорівнює 2,18. Для ацетону, як найгіршого в термодинамічному відношенні розчинника, цей коефіцієнт дорівнює 0,66.

Таблиця 1. Збільшення характеристичної в'язкості розчинів полімеру залежно від параметра густини енергії когезії δ розчинника

Розчинник	Значення параметрів розчинності*				$\frac{\eta - \eta_0}{\eta_0}$
	δd	δp	δh	δ	
Бензол	18,42	1,02	2,86	18,67	2,18
Толуол	17,99	1,43	2,04	18,18	1,81
Комплексний розчинник № 647	16,48	3,26	5,71	17,75	1,84
Ацетон	15,46	10,4	6,9	19,93	0,66
Етилацетат	15,18	5,3	9,2	18,56	1,32
Бутилацетат	15,65	3,7	6,3	17,3	1,53

* Загальний параметр розчинності згідно з теорією Гільденбранда–Скечарда розкладається на складові за дисперсійною (δd) і поляризаційною (δp) взаємодіями та взаємодією за водневим зв'язком (δh). Параметр δ є геометричною сумою цих складових.

Метод знаходження кількості нерозчинника, який необхідно додати до розчину полімеру, щоб викликати осадження з останнього, використовується для встановлення меж розчинності полімеру. Знаходження останніх дає можливість визначити здатність полімеру до розчинення в розчинниках з відомими параметрами розчинності δ . Визначення об'ємів осаджувача (в ролі осаджувача виступав гексан (для речовин зі слабкою взаємодією за рахунок водневих зв'язків) та вода (для речовин з сильною взаємодією за водневими зв'язками)) дозволило одержати діаграму меж розчинності полімеру залежно від значення δ розчинника. Діаграму наведено на рис. 1.

Таким чином, визначено, що бутилметакрилатний полімер має досить широкі межі розчинності, а отже, і порівняно велике значення радіуса сфери розчинності R , що збільшить вибір розчинників для подальших досліджень.

Слід зауважити, що діаграму побудовано за принципом трикутника Гіббса, тому межі розчинності не мають сферичної форми. З віскозиметричних даних випливає, що центр сфери розчинності знаходиться найближче до координат найкращого розчинника – бензолу.

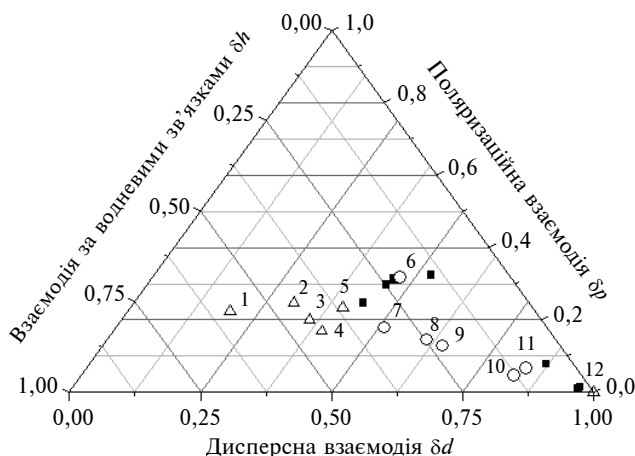


Рис. 1. Діаграма розчинності бутилметакрилатного полімеру: Δ – рідини, що не розчиняють полімер (1 – вода; 2 – метанол; 3 – етанол; 4 – пропанол; 5 – етилцеллозоль; 12 – гексан); \circ – рідини, що є розчинниками для полімеру (6 – ацетон; 7 – комплексний розчинник № 647; 8 – бутилацетат; 9 – етилацетат; 10 – бензол; 11 – толуол); \blacksquare – межі розчинності

З метою знаходження центра сфери розчинності було проведено підбір комплексного розчинника. Підбір робився з використанням як бінарних сумішей (бензол–ацетон, толуол–гексан), так і тринарних (бензол–толуол–ацетон, бензол–етилацетат–ацетон). Максимальне збільшення ефективної в'язкості ($K = 2,3$) зафіксовано у випадку суміші бензол–ацетон в об'ємному співвідношенні 0,9:0,1, відповідно. Координати цієї точки на діаграмі: $\delta d = 18,31$; $\delta p = 1,12$; $\delta h = 2,9$.

Дослідження бар'єрних властивостей лакових систем

Для визначення впливу термодинамічної сумісності розчинника з полімером на бар'єрні властивості полімерної плівки на першому етапі було приготовано п'ять розчинів бутилметакрилатного полімеру в різних розчинниках. Останні підбиралися, виходячи з їх термодинамічної якості відносно полімеру. Таким чином, було вибрано бензол та толуол як термодинамічно кращі розчинники, етилацетат і комплексний розчинник № 647 та ацетон – як об-

межено сумісні з полімером. Композиції мали однакову масову концентрацію полімеру (40%).

Після нанесення покриттів за допомогою аплікатора вони витримувалися в сушильній шафі протягом восьми годин при температурі 60 °С, а потім досушувалися в звичайних умовах до постійної маси. Час висихання покриттів варіювався: для композиції на основі ацетону він становив 15 діб, на основі розчинника № 647 та етилацетату – 20 діб, для бензолу та толуолу – 16 та 18 діб, відповідно.

Адсорбція парів води і значення водопоглинання для вільних плівок наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Взаємодія лакових плівок полімеру, одержаних з різних розчинників з водою

Розчинник	Адсорбція водяної пари $A \cdot 10^{-3}$, г/г плівки	Водопоглинання (за масою), %
Ацетон	14,5	2,72
Бензол	13,9	2,06
Толуол	13,8	2,03
Етилацетат	13,2	1,93
Комплексний розчинник № 647	13,2	1,99

Для визначення бар'єрних властивостей композицій застосовано ємнісно-омічний метод (метод електричного імпедансу). Було одержано графічні залежності питомого електричного опору та електричної ємності лакових по-

криттів на сталі марки 08 кп. Товщина покриттів знаходилася в межах 55–62 мкм. Результати дослідження наведено на рис. 2.

Таким чином, покриття, одержані з розчину етилацетату, характеризуються найбільшою бар'єрною стійкістю до дії розчину електроліту. Виходячи з даних з термодинамічної сумісності розчинників з полімером, можна зауважити, що ті розчинники, яким характерна більша різниця між їх параметрами δ і δ даного полімеру (етилацетат, комплексний розчинник № 647), дають можливість одержати захисне покриття з кращими бар'єрними характеристиками. Єдиним винятком є розчинник ацетон, оскільки для нього ця різниця максимальна, але результати електрохімічних досліджень свідчать про суттєве погіршення його бар'єрних властивостей порівняно з іншими розчинниками. Це пов'язано насамперед з режимом його видалення з покриття. Під час утворення плівки на стадії однорідного гелю на його поверхні утворюється тверда фаза полімеру, яка заважає видаленню розчинника, формується комірчаста структура твердих областей. На стику комірок утворюються слабкі місця, які знижують захисні властивості плівки в цілому. Підтвердженням цього може вважатися відмінність часів видалення розчинника з покриття: відомо [8], що термодинамічно якісні розчинники видаляються з покриття легше, ніж ті, що термодинамічно гірші сумісних з ним. У випадку ацетону ця залежність не має місця, що зумовлено його високою леткістю.

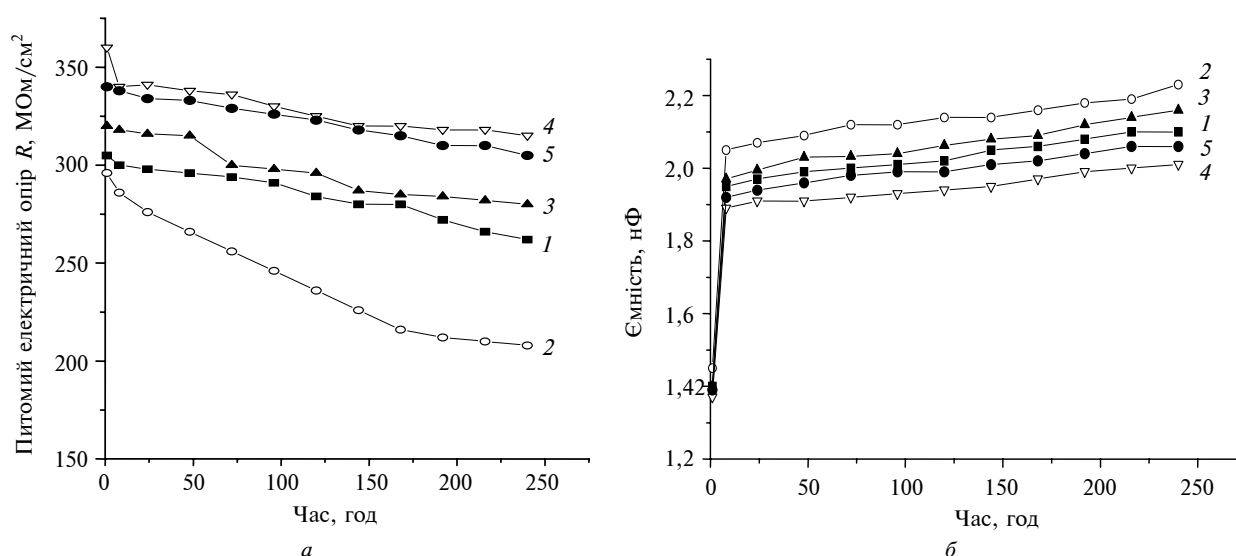


Рис. 2. Бар'єрні властивості лакових покриттів на сталі: а – зміна питомого електричного опору покриття в часі; б – зміна питомої електричної ємності покриття в часі на основі: 1 – бензолу; 2 – ацетону; 3 – толуолу; 4 – етилацетату; 5 – комплексного розчинника № 647

Висновки

Результати досліджень термодинамічної сумісності розчинника з полімером та бар'єрної стійкості лакових покриттів вказують на те, що головним критерієм вибору розчинника для захисного покриття є його обмежена термодинамічна сумісність з плівкоутворювачем. У випадку використання термодинамічно якісних розчинників бар'єрні властивості знижуються порівняно із вказаним вище. Сформульована методика визначення термодинамічної якості роз-

чинника дає змогу оцінити ступінь сумісності компонентів лакових матеріалів.

Крім того, при виборі розчинника для лакофарбових матеріалів слід приділяти увагу режиму його видалення з покриття, що безпосередньо визначається параметром леткості.

У подальших дослідженнях планується визначити вплив термодинамічної сумісності розчинника з плівкоутворювачем на бар'єрні властивості захисних композиційних матеріалів із наповнювачами різної природи.

В.А.Свидерский, А.В. Миронюк

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СОВМЕСТИМОСТИ РАСТВОРИТЕЛЯ И ПЛЕНКООБРАЗУЮЩЕГО ПОЛИМЕРА НА ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ЛАКОКРАСОЧНОГО ПОКРЫТИЯ

Определено значение плотности энергии когезии пленкообразующего полимера, с помощью вискозиметрического метода и метода осаждения установлены ее составляющие. Найденны границы растворимости полимера, построена диаграмма растворимости. Получены лаковые пленки с использованием растворителей разной степени термодинамической совместимости с полимером. Проведен анализ барьерных свойств этих материалов с помощью емкостно-омического метода. На основании этих данных сформулирован вывод о критерии выбора растворителя для оптимизации барьерных свойств лаковых материалов.

V.A. Svidersky, O.V. Myronyuk

THE INFLUENCE OF THERMODYNAMICAL COMPATIBILITY OF A SOLVENT AND FILM FORMING POLYMER ON PROTECTIVE ABILITY OF LACQUER COATING

This paper considers the value of density energy cohesion of film forming polymer and determines its properties, using the viscosimetric and precipitation methods. Furthermore, we define the borders of polymer solubility and correspondingly build the solubility diagram. Through experiments performed, we obtain the lacquer films, using the solvents with different thermodynamical compatibility to polymer. We analyze the barrier properties of these materials, employing the capacity-omic method. Based on this data, we formulate the criteria of solvent selection to optimize the barrier properties of lacquer materials.

1. *Зубельвейц М., Гнот В.* Антикоррозионные лакокрасочные материалы нового поколения // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2005. – № 6. – С. 5–11.
2. *Визек Ф.* Цинковые хлопья – эффективное средство антикоррозионной защиты // Там же. – 2006. – № 2-3. – С. 50–52.
3. *Дринберг С.А., Ицко Э.Ф., Калинин Т.В.* Антикоррозионные грунтовки. – СПб.: ООО НИИПРОИНС ЛКМ и П с ОП, 2006. – 168 с.
4. *Merlatti C., Perrin F.X., Aragon E., Margaillan A.* Evaluation of physico-chemical changes in sub-layers of multi-layer anticorrosive marine paint systems: Plasticizer and solvent release // Progress in organic coatings. – 2008. – 63, N 1. – P. 53–62.
5. *Дринберг С.А., Ицко Э.Ф.* Растворители для лакокрасочных материалов: Справочник. – СПб.: Химиздат, 2003. – 216 с.
6. *Брок Т., Гротеклаус М., Мишке П.* Европейское руководство по лакокрасочным материалам и покрытиям / Под ред. Л.Н. Машляковского. – М.:ООО “Пейнт-медиа”, 2004. – 548 с.
7. *Карякина М.И.* Лабораторный практикум по техническому анализу и контролю производства лакокрасочных материалов и покрытий. – М.: Химия, 1989. – 202 с.
8. *Ицко Э.Ф., Дринберг А.С.* Влияние растворителей на эксплуатационные свойства покрытий // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2006. – № 9. – С. 6–14.

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИХ НАУК

УДК 519.1

Р.А. Заторський, І.М. Литвиненко

ЗАСТОСУВАННЯ ПАРАПЕРМАНЕНТІВ ДО ЛІНІЙНИХ РЕКУРЕНТНИХ РІВНЯНЬ

Вступ

На сьогодні для лінійних рекурентних співвідношень доведено ряд загальних теорем, зміст яких, з відомих причин, є аналогами відповідних теорем з теорії лінійних однорідних і неоднорідних систем рівнянь із сталими коефіцієнтами та теорії однорідних і неоднорідних звичайних диференціальних рівнянь із сталими коефіцієнтами. Ці теореми є класичними і широко використовуються [1]. Проте навіть для лінійних однорідних рекурентних рівнянь із змінними коефіцієнтами загальних методів їх розв'язання і дослідження досі немає.

Лінійні рекурентні рівняння k -го порядку із сталими коефіцієнтами є важливим і ефективним інструментом, що знаходить свої застосування в різних галузях математики. Проте виникає найбільша необхідність в розв'язанні відповідного характеристичного рівняння k -го порядку, яке часто викликає значні труднощі.

Теоретичним інструментом для досліджень лінійних рекурентних рівнянь у даній статті є параперманенти трикутних матриць (див. [2, 3]).

Деякі результати даної статті анонсувалися в [4] та доповідалися на Міжнародній математичній конференції, присвяченій сторіччю від початку роботи Д.О. Граве в Київському університеті [5].

Постановка задачі

Метою статті є застосування параперманентів трикутних матриць до розв'язання лінійних рекурентних рівнянь, встановлення загальних співвідношень між членами числових послідовностей, згенерованих такими рівняннями, та виділення класу лінійних рекурентних рівнянь з нормальними початковими умовами, числові послідовності яких мають деякі загальні теоретико-числові властивості.

Метод дає змогу досліджувати лінійні рекурентні рівняння, минаючи розв'язання відповідних характеристичних рівнянь.

Означення параперманенту трикутної матриці

Розглянемо нижню трикутну матрицю

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & & & & \\ a_{21} & a_{22} & & & \\ \dots & \dots & \dots & & \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} & \end{pmatrix}_n. \quad (1)$$

Кожному елементу a_{ij} , $i \leq j$, цієї матриці поставимо у відповідність $i - j + 1$ елементів a_{ik} , $k = j, \dots, i$, які назвемо похідними елементами матриці, породженими ключовим елементом a_{ij} , що є одночасно і його похідним елементом.

Добуток всіх похідних елементів, породжених ключовим елементом a_{ij} , позначимо $\{a_{ij}\}$ і назвемо факторіальним добутком ключового елемента a_{ij} , тобто

$$\{a_{ij}\} = \prod_{k=j}^i a_{ik}.$$

Означення 1. Набір ключових елементів матриці (1) назвемо нормальним набором цієї матриці, якщо ключові елементи породжують множину похідних елементів потужності n , кожні два з яких не лежать в одному стовпці цієї матриці.

Розглянемо множину $A(n)$ впорядкованих розбиттів $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_r)$ натурального числа n . Нехай $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_r)$ — деякий елемент із цієї множини. Кожній компоненті α_s , $s = 1, \dots, r$, цього розбиття поставимо у відповідність ключовий елемент a_{ij} трикутної матриці за допомогою такого алгоритму.

1. Початок.
2. $j := 1$; $s := 0$; $i := 0$.
3. $s := s + 1$; $i := i + \alpha_s$, ключ. ел. $(s) := a_{ij}$.
4. Якщо $s < r$, то $j := j + \alpha_s$, перейти до п.3.
5. Кінець.

При цьому отримаємо нормальний набір ключових елементів, породжених розбиттям α . Кожному нормальному набору a ключових елементів припишемо знак $(-1)^{\varepsilon(a)}$, де $\varepsilon(a)$ — сума всіх індексів ключових елементів цього набору.

Означення 2. Параперманентом трикутної матриці (1) назвемо число

$$\text{prer}(A) = \sum_{(\alpha_1, \dots, \alpha_r) \in A(n)} \prod_{s=1}^r \{a_{i(s), j(s)}\},$$

де $a_{i(s), j(s)}$ – ключовий елемент, що відповідає s -й компоненті розбиття $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_r)$ із множини розбиттів $A(n)$.

Лінійні рекурентні рівняння та параперманенти

Часто буває так, що розв'язати характеристичне рівняння лінійного рекурентного рівняння k -го порядку важко, тоді його розв'язок можна знайти за допомогою параперманенту. При цьому справедлива наступна теорема, яка разом із наслідком 1 (див. далі) є теоретичним фундаментом цієї статті.

Теорема 1. Нехай задано два вектори

$$a = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_k),$$

$$b = (b_0 = 1, b_1, b_2, b_3, \dots, b_{k-1}).$$

Для послідовності $\{u_n\}_{n=0}^{\infty}$ рівносильні такі три рівняння:

1) лінійне рекурентне рівняння k -го порядку

$$u_n = a_1 u_{n-1} + a_2 u_{n-2} + a_3 u_{n-3} + \dots + a_k u_{n-k},$$

$$n = k, k + 1, k + 2, \dots$$

з початковими умовами

$$u_0 = b_0 = 1, u_1 = b_1, u_2 = b_2, \dots, u_{k-1} = b_{k-1}; \quad (2)$$

2) рівняння

$$u_n = \text{prer}(A_n) =$$

$$= \begin{bmatrix} a_1 c_1 & & & & & \\ \frac{a_2}{a_1} & a_1 c_2 & & & & \\ \dots & \dots & \ddots & & & \\ \frac{a_{k-1}}{a_{k-2}} & \frac{a_{k-2}}{a_{k-3}} & \dots & a_1 c_{k-1} & & \\ \frac{a_k}{a_{k-1}} & \frac{a_{k-1}}{a_{k-2}} & \dots & \frac{a_2}{a_1} & a_1 & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots \\ 0 & \frac{a_k}{a_{k-1}} & \dots & \frac{a_3}{a_2} & \frac{a_2}{a_1} & a_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \frac{a_k}{a_{k-1}} & \dots & \frac{a_2}{a_1} & a_1 \end{bmatrix}_n. \quad (3)$$

Тут поправки c_i визначаються з рівностей

$$c_i = b_i \left(\sum_{s=1}^i a_s b_{i-s} \right)^{-1} = \frac{b_i}{a_i + a_{i-1} b_1 + a_{i-2} b_2 + \dots + a_2 b_{i-2} + a_1 b_{i-1}},$$

де $i = 1, \dots, k - 1$;

3) рівняння

$$1 + \sum_{i=1}^{\infty} u_i z^i = 1 + b_1 \left(1 - \frac{1}{c_1} \right) z^1 + b_2 \left(1 - \frac{1}{c_2} \right) z^2 + \dots \dots + b_{k-1} \left(1 - \frac{1}{c_{k-1}} \right) z^{k-1} = \frac{1 - a_1 z - a_2 z^2 - \dots - a_k z^k}{1 - a_1 z - a_2 z^2 - \dots - a_k z^k}.$$

Доведення. Рівносильність перших двох рівнянь випливає з того, що поправки

$$c_i = \frac{b_i}{a_i + a_{i-1} b_1 + \dots + a_2 b_{i-2} + a_1 b_{i-1}}, \quad i = 1, 2, \dots, k - 1,$$

є розв'язками системи рівнянь

$$\left[(1 + \delta_{sr} (c_s - 1)) \frac{a_{s-r+1}}{a_{s-r}} \right]_{1 \leq r \leq s \leq i} = b_i, \quad i = 1, 2, \dots,$$

та розкладу параперманенту в рівнянні (3) при $n = k, k + 1, k + 2, \dots$ за елементами останнього рядка.

Відзначимо, що теорема 1 справедлива також для рекурентних рівнянь із змінними коефіцієнтами.

Зауваження 1. Теорема 1, по своїй суті, є теоремою Стенлі, вираженою в термінах параперманентів (див. [6, с. 301]). У зв'язку з цим доведення рівносильності першого і третього рівнянь теореми опускаємо (див. також [8]).

З теореми випливає такий наслідок.

Наслідок 1. Нехай задано два вектори

$$a = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_k),$$

$$b = (b_0 = 1, b_1, b_2, b_3, \dots, b_{k-1}),$$

де

$$b_i = \begin{bmatrix} a_1 \\ \frac{a_2}{a_1} & a_1 \\ \dots & \dots & \ddots \\ \frac{a_{i-1}}{a_{i-2}} & \frac{a_{i-2}}{a_{i-3}} & \dots & a_1 \end{bmatrix}_i, \quad i = 1, \dots, k-1.$$

$$u_0 = 1, u_i = \begin{bmatrix} a_1 \\ \frac{a_2}{a_1} & a_1 \\ \dots & \dots & \ddots \\ \frac{a_{i-1}}{a_{i-2}} & \frac{a_{i-2}}{a_{i-3}} & \dots & a_1 \end{bmatrix}_i, \quad i = 1, \dots, k-1, \quad (6)$$

Для послідовності $\{u_n\}_{n=0}^\infty$ рівносильні такі три рівняння:

1) лінійне рекурентне рівняння k -го порядку

$$u_n = a_1 u_{n-1} + a_2 u_{n-2} + a_3 u_{n-3} + \dots + a_k u_{n-k},$$

$$n = k, k+1, k+2, \dots, \quad (4)$$

з початковими умовами

$$u_0 = b_0 = 1, u_1 = b_1, u_2 = b_2, \dots, u_{k-1} = b_{k-1};$$

2) рівняння

$$u_n = \begin{bmatrix} a_1 \\ \frac{a_2}{a_1} & a_1 \\ \dots & \dots & \ddots \\ \frac{a_k}{a_{k-1}} & \frac{a_{k-1}}{a_{k-2}} & \dots & a_1 \\ 0 & \frac{a_k}{a_{k-1}} & \dots & \frac{a_2}{a_1} & a_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots \\ 0 & \dots & 0 & \frac{a_k}{a_{k-1}} & \dots & \frac{a_2}{a_1} & a_1 \end{bmatrix}_n, \quad (5)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots;$$

3) рівняння

$$\frac{1}{1 - a_1 x - a_2 x^2 - \dots - a_k x^k} = 1 + \sum_{i=1}^\infty u_i x^i.$$

Початкові умови для рекурентного рівняння (4) перепишемо у вигляді

і називаються *нормальними початковими умовами*, а послідовність, що генерується відповідним рекурентним співвідношенням, — *нормальною послідовністю*.

Теоретико-числові властивості рекурентних послідовностей k -го порядку

Теорема 2. Якщо послідовності $\{u_n^*\}_{n=1}^\infty$ і

$\{u_n\}_{n=1}^\infty$ задовольняють рекурентне рівняння (3) k -го порядку з початковими умовами (2) і (6), відповідно, причому $k < r$, то виконуються співвідношення

$$u_{r+s}^* = \sum_{i=1}^k a_i \left(\sum_{j=r-i+1}^r u_j^* u_{r+s-i-j+1} \right). \quad (7)$$

Доведення. За теоремою 1, параперманент (5) є розв'язком рівняння (4) з початковими умовами (6). Розкладемо цей параперманент при $n = r + s$ за елементами вписаної прямокутної таблиці $T(r)$. При цьому, якщо b_{ij} — деякий елемент вписаної таблиці $T(r)$, то перший ріг $R_{j-1,1}$ його алгебричного доповнення $P_{ij} = \text{prer}(R_{j-1,1}) \text{prer}(R_{r+s-1, i+1})$, крім коефіцієнтів рівняння (4), буде містити в собі поправки x_t , $t = 1, \dots, k$, які задаються рівностями $x_t = 1$. Тому параперманент рога $R_{j-1,1}$ є j -м членом послідовності $\{u_n^*\}_{n=1}^\infty$. У другому розі ці поправки дорівнюють одиниці, тому його параперманент є $r + s - i$ -м членом послідовності $\{u_n\}_{n=1}^\infty$. Очевидно, що $b_{ij} = 0$, якщо $k - 1 < i - j$, і $b_{ij} = a_{i-j+1}$, якщо $0 \leq i - j \leq k$. Якщо $i - j = k - 1$, то $b_{ij} = a_k$, $i = j + k - 1$, і j набуває значень від $r - k + 1$ до r , тому всі доданки, які входять у розклад параперманенту u_{r+s}^* за

елементами таблиці $T(r)$, що містять коефіцієнт a_k рівняння (4), ввійдуть до суми

$$a_k \sum_{j=r-k+1}^r u_j^* u_{r+s-j-k+1}.$$

Якщо ж $i - j = k - 2$, то $b_{ij} = a_{k-1}$, $i = j + k - 2$, $j = r - k + 2, \dots, r$, і аналогічна сума має вигляд

$$a_{k-1} \sum_{j=r-k+2}^r u_j^* u_{r+s-j-k+2}.$$

Продовжуючи процес обчислень таких сум, через $(k - 1)$ кроків отримаємо рівність $i - j = 0$, тобто прийдемо до суми

$$a_1 \sum_{j=r}^r u_j^* u_{r+s-j}.$$

Таким чином, індекс i коефіцієнтів a_i буде набувати значень від 1 до k і розклад парамперманенту u_{r+s}^* за елементами вписаної прямокутної таблиці $T(r)$ матиме вигляд (7).

Наслідок 2. Якщо послідовність $\{u_n\}_{n=1}^\infty$ задовольняє рекурентне рівняння (4) з нормальними початковими умовами (6), то для її членів виконуються співвідношення

$$u_{r+s} = \sum_{i=1}^k a_i \left(\sum_{j=r-i+1}^r u_j u_{r+s-i-j+1} \right). \quad (8)$$

Справедливість цього наслідку безпосередньо випливає з теореми 2. Запишемо співвідношення (8) при $k = 1, 2, 3$:

$$k = 1 \quad u_{r+s} = a_1 u_r u_s;$$

$$k = 2 \quad u_{r+s} = a_1 u_r u_s + a_2 (u_{r-1} u_s + u_r u_{s-1});$$

$$k = 3 \quad u_{r+s} = a_1 u_r u_s + a_2 (u_{r-1} u_s + u_r u_{s-1}) + a_3 (u_{r-2} u_s + u_{r-1} u_{s-1} + u_r u_{s-2}).$$

Теорема 3. Нехай послідовність $\{u_n\}_{n=1}^\infty$ задовольняє рекурентне рівняння другого порядку

$$u_{n+2} = a_1 u_{n+1} + a_2 u_n \quad (9)$$

з цілими ненульовими коефіцієнтами і нормальними початковими умовами

$$u_1 = 1, u_2 = a_1. \quad (10)$$

Тоді:

1) виконуються рівності

$$u_{r+s} = u_{r+1} u_s + a_2 u_r u_{s-1}, r = 1, 2, \dots; s = 2, 3, \dots, \quad (11)$$

$$u_{sr} \equiv 0 \pmod{u_r}, s, r = 1, 2, \dots; \quad (12)$$

2) якщо в рівнянні (9) коефіцієнти взаємно прості, тобто $(a_1, a_2) = 1$, то маємо

$$(u_r, u_s) = u_{(s,r)}. \quad (13)$$

Доведення. 1. Доведемо справедливість рівності (11). До рівняння (9) з початковими умовами (10) можна застосувати наслідок 2. При $k = 2$ рівність (8) має вигляд

$$u_{r+s} = a_2 u_{r-1} u_s + a_1 u_r u_s + a_2 u_r u_{s-1}.$$

Враховуючи рівняння (9), маємо

$$u_{r+s} = u_s (a_1 u_r + a_2 u_{r-1}) + a_2 u_r u_{s-1} = u_{r+1} u_s + a_2 u_r u_{s-1}.$$

Доведемо справедливість рівності (12). При $s = 2$ рівність (11) має вигляд

$$u_{2r} = u_r (u_{r+1} + a_2 u_{r-1}),$$

тобто (12) справедлива при $s = 1$ і при $s = 2$.

Нехай рівність (12) виконується при $s = 1, 2, \dots, m - 1$. Доведемо її справедливість при $s = m$:

$$u_{mr} = u_{(m-r)r+r} = u_{(m-1)r+1} u_r + a_2 u_{(m-1)r} u_{r-1}.$$

Оскільки $u_{(m-1)r} \equiv 0 \pmod{u_r}$, то рівність (12) справедлива при $s = m$.

2. Доведемо справедливість рівності (13). Спочатку покажемо, що виконуються рівності

$$(u_n, u_{n+1}) = 1, n = 1, 2, \dots, \quad (14)$$

$$(a_2, u_n) = 1, n = 1, 2, \dots \quad (15)$$

Очевидно, що при $n = 1$ рівність (14) справедлива. Нехай рівність (14) виконується при $n = k$. Доведемо, що вона виконується і для $n = k + 1$. Припустимо протилежне:

$$1 < d = (u_{k+1}, u_{k+2}).$$

Тоді з рівняння (9) при $n = k$ випливає, що або u_k кратне d , або a_2 кратне d . У першому випадку приходимо до суперечності з припу-

щенням, що рівність (14) виконується при $n = k$, а у другому випадку – з рівняння (9) при $n = k$ випливає, що a_1 кратне d , а це суперечить взаємній простоті коефіцієнтів рівняння (9). Таким чином, рівність (14) виконується для довільного натурального n . Справедливість (15) випливає з того, що припущення протилежного твердження разом з (9) при $n = s - 1$ приводить до протиріччя з (14).

Нехай тепер $s < r$. Тоді, враховуючи рівність (11), маємо

$$(u_r, u_s) = (u_{r-s+s}, u_r) = (u_{r-s+1}u_s + a_2u_{r-s}u_{s-1}, u_s) = (a_2u_{r-s}u_{s-1}, u_s).$$

З рівностей (14), (15) випливає, що

$$(a_2u_{s-1}, u_s) = 1.$$

Тому маємо

$$(u_r, u_s) = (u_{r-s}, u_s),$$

звідки відразу випливає справедливість (13).

Наслідок 3. Якщо послідовність $\{u_n\}_{n=1}^\infty$ задовольняє умови теореми 3, причому $u_k \neq 1$, $2 \leq k$, то член u_s цієї послідовності є простим числом лише тоді, коли s – просте число.

Доведення випливає з рівності (12).

Наслідок 4. Нехай послідовність $\{u_n\}_{n=1}^\infty$ задовольняє умови теореми 3 і p – просте число. Тоді u_p не має спільних дільників із своїми попередніми членами цієї послідовності.

Доведення наслідку випливає з рівності (12).

Наслідок 5. Нехай послідовність $\{u_n\}_{n=1}^\infty$ задовольняє умови теореми 3. Якщо $a_2 = b^2$, де b – ціле число, то кожен член u_{2m+1} , $1 < m$, цієї послідовності можна подати у вигляді суми квадратів двох цілих невід’ємних чисел, причому виконуватиметься рівність

$$u_{2m+1} = u_{m+1}^2 + (bu_m)^2.$$

Доведення. Справедливість цього наслідку випливає з рівності (11) при $r = n$, $s = n + 1$.

Наслідок 6. Для довільного натурального m виконується тотожність

$$\begin{aligned} & \sum_{i=0}^m (-1)^i \binom{2m-i}{i} a^{2(m-i)} b^{2i} = \\ & = \left(\sum_{i=0}^{\lfloor m/2 \rfloor} (-1)^i \binom{m-i}{i} a^{m-2i} b^{2i} - \right. \\ & \left. - \sum_{i=0}^{\lfloor (m-1)/2 \rfloor} (-1)^i \binom{m-i-1}{i} a^{m-2i-1} b^{2i+1} \right) \times \\ & \times \left(\sum_{i=0}^{\lfloor m/2 \rfloor} (-1)^i \binom{m-i}{i} a^{m-2i} b^{2i} + \right. \\ & \left. + \sum_{i=0}^{\lfloor (m-1)/2 \rfloor} (-1)^i \binom{m-i-1}{i} a^{m-2i-1} b^{2i+1} \right). \end{aligned}$$

Доведення. Розглянемо послідовність $\{u_n\}_{n=1}^\infty$, яка задовольняє умови теореми 3, причому $a_1 = 1$, $a_2 = -b^2$, де b – деяке ціле число, яке не дорівнює нулю.

Доведемо спочатку справедливість рівностей

$$\begin{aligned} u_n &= \begin{bmatrix} a & & & & \\ -\frac{b^2}{a} & a & & & \\ 0 & -\frac{b^2}{a} & a & & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \\ 0 & 0 & \dots & -\frac{b^2}{a} & a \end{bmatrix}_{n-1} = \\ &= \sum_{i=0}^{\lfloor (n-1)/2 \rfloor} (-1)^i \binom{n-i-1}{i} a^{n-2i-1} b^{2i}. \end{aligned} \quad (16)$$

Ліва частина (16) випливає з наслідку 1. Доведемо праву частину (16) за індукцією по n . При $n = 2$ маємо

$$u_2 = a = \sum_{i=0}^0 (-1)^i \binom{1-i}{i} a^{1-2i} b^{2i} = a.$$

Нехай рівності (16) справедливі для всіх $2 \leq n < k$. Розкладемо парперманент із рівностей (16) при $n = k$ за елементами останнього рядка. Враховуючи припущення індукції, маємо

$$u_k = au_{k-1} - b^2u_{k-2} =$$

$$= a \sum_{i=0}^{[(k-2)/2]} (-1)^i \binom{k-i-2}{i} a^{k-2i-2} b^{2i} -$$

$$- b^2 \sum_{i=0}^{[(k-3)/2]} (-1)^i \binom{k-i-3}{i} a^{k-2i-3} b^{2i}.$$

Нехай у другій сумі $j = i + 1$. Тоді, враховуючи рівності

$$\left[\frac{k-1}{2} \right] = \left[\frac{k-2}{2} \right]$$

для парного значення k і

$$\left[\frac{k-1}{2} \right] = \left[\frac{k-2}{2} \right] + 1$$

для непарного значення k , отримаємо рівності

$$u_k = \sum_{i=0}^{[(k-2)/2]} (-1)^i \binom{k-i-2}{i} a^{k-2i-1} b^{2i} +$$

$$+ \sum_{j=0}^{[(k-1)/2]} (-1)^j \binom{k-j-1}{j-1} a^{k-2j-1} b^{2j} = a^{k-1} +$$

$$+ a^{k-1} + \sum_{i=0}^{[(k-1)/2]} (-1)^i \left(\binom{k-i-2}{i} + \right.$$

$$\left. + \binom{k-i-1}{i-1} \right) a^{k-2i-1} b^{2i} =$$

$$= \sum_{i=0}^{[(k-1)/2]} (-1)^i \binom{k-i-1}{i} a^{k-2i-1} b^{2i}.$$

Тепер для доведення наслідку 6 достатньо отриманий вираз для u_k підставити в очевидну тотожність:

$$u_{2m+1} = u_{m+1}^2 - b^2 u_m^2 = (u_{m+1} - bu_m)(u_{m+1} + bu_m).$$

Приклад 1. При $m = 7$ і $m = 11$ тотожність наслідку 6 матиме відповідно вигляд

$$a^6 - 5a^4b^2 + 6a^2b^4 - b^6 =$$

$$= (a^3 - 2ab^2 - a^2b + b^3)(a^3 - 2ab^2 + a^2b - b^3),$$

$$a^{10} - 9a^8b^2 + 28a^6b^4 - 35a^4b^6 + 15a^2b^8 - b^{10} =$$

$$= (a^5 - a^4b - 4a^3b^2 + 3a^2b^3 + 3ab^4 - b^5) \times$$

$$\times (a^5 + a^4b - 4a^3b^2 - 3a^2b^3 + 3ab^4 + b^5).$$

Приклад 2. Рекурентне рівняння

$$u_{n+2} = (k+1)u_{n+1} - ku_n$$

з нормальними початковими умовами

$$u_1 = 1, u_2 = k+1, 1 \leq k$$

генерує послідовність чисел $\left\{ \frac{k^n - 1}{k - 1} \right\}_{n=1}^{\infty}$.

Звернемо увагу на те, що умова $1 \leq k$ забезпечує виконання умови $u_k \neq 1, 2 \leq k$ наслідку 3. Згідно з наслідком 3 число $\frac{k^n - 1}{k - 1}$, можливо, є простим, якщо тільки n – просте число. При $k = 2$ отримаємо відомий факт про те, що прості числа Мерсена містяться серед чисел виду $2^p - 1$, де p – деяке просте число. При $k = 10$ отримуємо, що реп'юніти (прості числа, які в десятковій системі числення зображаються у вигляді $\underbrace{11\dots1}_n$) також можна знайти при простих значеннях n .

Зауваження 2. Оскільки рекурентне рівняння $u_{n+2} = u_{n+1} + u_n$ з нормальними початковими умовами $u_1 = u_2 = 1$ генерує послідовність чисел Фібоначчі, то теорему 3 можна розглядати як узагальнення деяких співвідношень для чисел Фібоначчі (див. [7, с. 325–327]).

Висновки

Застосування параперманентів трикутних матриць є досить ефективним при розв'язанні лінійних рекурентних рівнянь k -го порядку із сталими та змінними коефіцієнтами. За їх допомогою виділяється важливий клас числових послідовностей із нормальними початковими умовами та встановлюються загальні співвідношення між членами числової послідовності, які виявляються ефективними при дослідженні теоретико-числових властивостей числових послідовностей. Метод може бути корисним при дослідженні деяких аддитивних задач теорії чисел.

Р.А. Заторський, И.Н. Литвиненко

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАПЕРМАНОЕНТОВ К ЛИНЕЙНЫМ РЕКУРРЕНТНЫМ УРАВНЕНИЯМ

Рассматриваются применения параперманентов треугольных матриц к исследованию свойств числовых последовательностей, порожденных линейными рекуррентными уравнениями k -го порядка с постоянными коэффициентами. В частности, доказаны некоторые общие утверждения о свойствах теоретико-числовых последовательностей, порожденных линейными рекуррентными уравнениями второго порядка.

R.A. Zatorsky, I.M. Lytvynenko

APPLICATIONS OF PARAPERMANENTS OF LINEAR RECURRENT SEQUENCES

In this paper, we consider the application of para-permanents to study of numerical sequences, generated by recurrent equation of k -th order with constant coefficients. Specifically, we substantiate some general statements on number-theoretical properties of numerical sequences, generated by recurrent equation of the second order.

1. *Гельфонд А.О.* Исчисление конечных разностей. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1959. — 400 с.
2. *Заторський Р.А.* Про паравизначники та параперманенти трикутних матриць // Математичні студії. — 2002. — 17, №1. — С. 3–17.
3. *Заторський Р.А.* Паравизначники та параперманенти трикутних матриць // Доп. НАН України. — 2002. — № 8. — С. 21–25.
4. *Zatorsky R.A.* Theory of paradeterminants and its applications // Algebra and Diskrete Mathematics. — 2007. — N 1. — P. 109–138.
5. *Заторський Р.А.* Параперманенти та лінійні рекурентні співвідношення // Матер. міжнар. мат. конф., присвяченій сторіччю від початку роботи Д.О. Граве в Київському університеті. — К., 2002. — С. 138.
6. *Стенли Р.* Перечислительная комбинаторика / Пер. с англ. — М.: Мир, 1990. — 440 с.
7. *Грэхем Р., Кнут Д., Паташник О.* Конкретная математика. Основание информатики / Пер. с англ. — М.: Мир, 1998. — 704 с.
8. *Ландо С.К.* Лекции о производящих функциях. — М.: МЦНМО, 2004. — 144 с.

Рекомендована Радою
Фізико-технічного інституту
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
13 березня 2008 року

УДК 517.9

В.О. Капустян, П.О. Касьянов, О.П. Когут

ВЛАСТИВОСТІ РОЗВ'ЯЗКІВ КЛАСУ ПАРАМЕТРИЗОВАНИХ ОПЕРАТОРНИХ ВКЛЮЧЕНЬ**Вступ**

Операторні включення $A(y) \ni f \in$ об'єктом інтенсивних досліджень упродовж останніх десятиліть. Вони застосовуються при розв'язанні задач математичної фізики, диференціальних рівнянь у частинних похідних, диференціальні оператори яких допускають розрив по фазовій змінній, диференціальних рівнянь із розривною правою частиною, задач теорії керування та оптимізації.

Основні результати теорії розв'язності нелінійних операторних рівнянь, породжуючі оператори яких задовольняли властивості монотонності та псевдомонотонності, викладені Ж.-Л. Ліонсом [2], Х. Гаєвським, К. Грегером, К.Захаріасом [3]. Запропонована І.В. Скрипником [4] ідея переходу в класичних означеннях до підпоследовностей, яка була реалізована в працях В.С. Мельника і М.З. Згуровського, дала можливість розглядати більш широкий клас λ_0 -псевдомонотонних відображень, замкнений відносно суми відображень, що для класів, які вивчалися у [2, 3], було проблематичним. Так, у працях [5–8, 9–11] досліджувались проблеми розв'язності стаціонарних операторних включень, а еволюційні включення розглядалися в [12–14].

Постановка задачі

У даній статті вивчається розв'язність параметризованих операторних включень вигляду $A(y, u) \ni f$ та їх залежність від функціональних параметрів $u \in U$. Мотивацією досліджень є використання таких об'єктів при математичному моделюванні багатьох реальних процесів (див., наприклад, праці А.О. Чикрія [1]).

У статті введено аналог властивості S_k , запропонованої І.В. Скрипником [4], для випадку многозначних операторів (надалі позначатимемо її \bar{S}_k). Властивість \bar{S}_k узагальнює клас відображень λ_0 -псевдомонотонного типу і на відміну від таких операторів є інваріантною

відносно операції множення відображення на (-1) . Клас многозначних операторів, які задовольняють властивість \bar{S}_k , досі систематично не вивчався. У статті доводиться теорема про розв'язність відповідних операторних включень та досліджуються основні властивості множини їх розв'язків.

Дослідження властивостей розв'язків

Нехай X – рефлексивний банахів простір, X^* – простір, топологічно спряжений до нього, $\langle \cdot, \cdot \rangle_X : X^* \times X \rightarrow \mathbb{R}$ – операція канонічного спарювання, 2^{X^*} – сукупність всіх підмножин простору X^* , $A : X \rightarrow 2^{X^*}$ – многозначне відображення. Для такого відображення визначимо множини: $\text{Dom } A = \{y \in X \mid A(y) \neq \emptyset\}$, $\text{gr } A = \{(\xi; y) \in X^* \times X \mid \xi \in A(y)\}$.

Всюди далі многозначне відображення A , для якого $\text{Dom } A = X$, будемо називати строгим і позначати його як $A : X \rightarrow 2^{X^*} \setminus \{\emptyset\}$. Із строгим многозначним відображенням A пов'яжемо його верхню $[A(y), \xi]_+ = \sup_{d \in A(y)} \langle d, \xi \rangle_X$ і нижню $[A(y), \xi]_- = \inf_{d \in A(y)} \langle d, \xi \rangle_X$ опорні функції, де $y, \xi \in X$. Будемо пов'язувати з відображенням $A : X \rightarrow 2^{X^*} \setminus \{\emptyset\}$ відображення $\text{co } A : X \rightarrow 2^{X^*} \setminus \{\emptyset\}$ і $\overline{\text{co}} A : X \rightarrow 2^{X^*} \setminus \{\emptyset\}$, які визначені за правилами $(\text{co } A)(y) = \text{co}(A(y))$ і $(\overline{\text{co}} A)(y) = \overline{\text{co}}(A(y))$, відповідно. Тут через $\overline{\text{co}}(A(y))$ позначено слабіше замикання в просторі X^* опуклої оболонки множини $A(y)$.

Твердження 1 [15]. Нехай $A, B : X \rightarrow 2^{X^*} \setminus \{\emptyset\}$. Тоді для всіх $y, v, v_1, v_2 \in X$ справедливі твердження:

- функціонал $X \ni v \rightarrow [A(y), v]_+$ є опуклим, додатно однорідним та напівнеперервним знизу;

- виконуються нерівності

$$[A(y), v_1 + v_2]_+ \leq [A(y), v_1]_+ + [A(y), v_2]_+,$$

$$[A(y), v_1 + v_2]_- \geq [A(y), v_1]_- + [A(y), v_2]_-,$$

$$[A(y), v_1 + v_2]_+ \geq [A(y), v_1]_+ + [A(y), v_2]_-,$$

$$[A(y), v_1 + v_2]_- \leq [A(y), v_1]_+ + [A(y), v_2]_-;$$

- мають місце рівності

$$[A(y) + B(y), v]_+ = [A(y), v]_+ + [B(y), v]_+,$$

$$[A(y) + B(y), v]_- = [A(y), v]_- + [B(y), v]_-,$$

$$\|\overline{\text{co}}^* A(y)\|_+ = \|A(y)\|_+, \quad \|\overline{\text{co}}^* A(y)\|_- = \|A(y)\|_-,$$

$$[A(y), v]_+ = [\overline{\text{co}}^* A(y), v]_+, \quad [A(y), v]_- = [\overline{\text{co}}^* A(y), v]_-;$$

- виконуються нерівності

$$[A(y), v]_+ \leq \|A(y)\|_+ \|v\|_X,$$

$$[A(y), v]_- \leq \|A(y)\|_- \|v\|_X;$$

- будуть справедливі співвідношення

$$d \in \overline{\text{co}}^* A(y) \Leftrightarrow \forall \omega \in X \quad [A(y), \omega]_+ \geq \langle d, \omega \rangle_X.$$

Нехай далі Y – рефлексивний або сепарабельний нормований простір, Y^* – простір, спряжений до нього, U – непорожня, опукла, *-слабко замкнена множина в Y^* . Параметризованим операторним включенням будемо називати такий об'єкт:

$$A(y, u) \ni f, \quad u \in U, \tag{1}$$

де $A : X \times U \rightarrow 2^{X^*} \setminus \{\emptyset\}$; $f \in X^*$.

Класи відображень

Введемо такі поняття.

Означення 1. Многозначне відображення $A : X \times U \rightarrow 2^{X^*} \setminus \{\emptyset\}$ називається λ_0 -квазімонотонним, якщо для довільної послідовності $\{y_n, u_n\}_{n \geq 1} \subset X \times U$, такої, що для деяких $y_0 \in X$, $u_0 \in U$ $y_n \rightarrow y_0$ слабко в X , $u_n \rightarrow u_0$ *-слабко в Y^* , $d_n \rightarrow d$ слабко в X^* ($d_n \in \overline{\text{co}} A(y_n, u_n) \forall n \geq 1$) при $n \rightarrow +\infty$, з нерівності

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \langle d_n, y_n - y \rangle_X \leq 0$$

впливає існування підпослідовності $\{y_{n_k}, u_{n_k}\}_{k \geq 1}$

з $\{y_n, u_n\}_{n \geq 1}$, для якої виконується нерівність

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \langle d_{n_k}, y_{n_k} - w \rangle_X \geq [A(y_0, u_0), y_0 - w]_- \quad \forall w \in X.$$

Означення 2. Будемо говорити, що відображення $A : X \times U \rightarrow 2^{X^*} \setminus \{\emptyset\}$ задовольняє властивість \overline{S}_k , якщо з того, що $y_n \rightarrow y_0$ слабко в X , $U \ni u_n \rightarrow u_0 \in U$ *-слабко в Y^* , $d_n \rightarrow d$ слабко в X^* ($d_n \in \overline{\text{co}} A(y_n, u_n) \forall n \geq 1$), та з того, що

$$\langle d_n, y_n - y_0 \rangle_X \rightarrow 0 \quad \text{при } n \rightarrow \infty, \tag{2}$$

впливає $d \in \overline{\text{co}} A(y_0, u_0)$.

Зауваження 1. Якщо $A : X \times U \rightarrow 2^{X^*} \setminus \{\emptyset\}$ задовольняє властивість \overline{S}_k , то оператор $(-A) : X \times U \rightarrow 2^{X^*} \setminus \{\emptyset\}$ також задовольняє дану властивість.

Наступне твердження належним чином впорядковує класи відображень типу \overline{S}_k та λ_0 -квазімонотонного типу.

Твердження 2. Многозначне λ_0 -квазімонотонне відображення задовольняє властивість \overline{S}_k .

Доведення. Розглянемо послідовності $U \ni u_n \rightarrow u_0 \in U$ *-слабко в Y^* та $y_n \rightarrow y_0$ слабко в X , $d_n \rightarrow d$ слабко в X^* ($d_n \in \overline{\text{co}} A(y_n, u_n) \forall n \geq 1$), і нехай для них виконується співвідношення (2), а це означає, що $\lim_{n \rightarrow \infty} \langle d_n, y_n \rangle = \langle d, y_0 \rangle_X$. Доведемо, що $d \in \overline{\text{co}} A(y_0, u_0)$. З того, що оператор $A \in \lambda_0$ -квазімонотонним, та із співвідношення (2) впливає існування підпослідовності $\{y_m, u_m\}_{m \geq 1}$ з $\{y_n, u_n\}_{n \geq 1}$, для якої виконується нерівність

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \langle d_m, y_m - w \rangle_X \geq [A(y_0, u_0), y_0 - w]_- \quad \forall w \in X.$$

Перетворимо дану нерівність. Матимемо

$$\begin{aligned} & \forall w \in X \quad [A(y_0, u_0), y_0 - w]_- \leq \\ & \leq \overline{\lim}_{x \rightarrow \infty} \langle d_m, y_m \rangle_X - \lim_{x \rightarrow \infty} \langle d_m, w \rangle_X = \langle d, y_0 - w \rangle_X. \end{aligned}$$

Користуючись твердженням 1, отримуємо, що $d \in \overline{\text{co}} A(y_0, u_0)$. Твердження доведене.

Означення 3. Будемо говорити, що відображення $A : X \times U \rightarrow 2^{X^*} \setminus \{\emptyset\}$ є демізамкненим, якщо з того, що $y_n \rightarrow y_0$ сильно в X ,

$U \ni u_n \rightarrow u_0 \in U$ *-слабко в Y^* , $d_n \rightarrow d$ слабко в X^* ($d_n \in \overline{\text{co}}A(y_n, u_n) \quad \forall n \geq 1$), випливає, що $d \in \overline{\text{co}}A(y_0, u_0)$.

Твердження 3. Многозначне відображення, що задовольняє властивість \bar{S}_k , є демізамкненим.

Означення 4. Многозначне відображення $A : X \rightarrow 2^{X^*} \setminus \{\emptyset\}$ задовольняє властивість (П): якщо для деякого $k > 0$, деякої обмеженої множини $B \subset X$ та для деякого селектора $d \in A$ виконується нерівність $\langle d(y), y \rangle_X \leq k$ для всіх $y \in B$, то існує таке $C > 0$, що $\|d(y)\|_{X^*} \leq C$ для всіх $y \in B$.

Зауваження 2. Сума многозначних відображень, що задовольняють властивість (П), теж задовольняє властивість (П).

Означення 5. Многозначне відображення $A : X \rightarrow 2^{X^*} \setminus \{\emptyset\}$ називається:

- локально обмеженим, якщо для довільного фіксованого $y \in X$ існують константи $m > 0$ і $M > 0$, такі, що $\|A(\xi)\|_+ \leq M$, коли $\|y - \xi\|_X \leq m$;
- скінченновимірно локально обмеженим, якщо для довільного скінченновимірного простору $F \subset X$ звуження A на F є локально обмеженим.

Основні результати

Означення 6. Будемо говорити, що $y \in X$ є слабким розв'язком задачі (1) при заданих $f \in X^*$ та $u \in U$, якщо $\overline{\text{co}}A(y, u) \ni f$, тобто якщо $[A(y, u), w]_+ \geq \langle f, w \rangle_X \quad \forall w \in X$.

Для фіксованих $u \in U$, $f \in X^*$ позначимо $K(u, f)$ множину слабких розв'язків включення (1).

Теорема 1. Нехай многозначне відображення $A : X \times U \rightarrow 2^{X^*} \setminus \{\emptyset\}$ задовольняє властивість \bar{S}_k , $U \ni u_n \rightarrow u \in U$ *-слабко в Y^* , $f_n \rightarrow f$ сильно в X^* . Тоді

$$\bigcap_{n \geq 1} \bigcup_{m \geq n} \overline{K(u_m, f_m)}^w \subset K(u, f), \quad (2)$$

де \bar{U}^w – слабке замикання множини $U \subset X$ в X .

Більше того, якщо існують $u \in U$, $f \in X^*$, $r > 0$, такі, що

$$[A(y, u) - f, y]_+ \geq 0 \quad \forall y \in X : \|y\|_X = r, \quad (3)$$

а відображення $X \ni y \rightarrow A(y, u)$ – скінченновимірно локально обмежене і задовольняє властивість (П), то $K(u, f)$ – непорожня, слабко замкнена множина в X .

Доведення. Нехай $\aleph(X)$ – сукупність всіх скінченновимірних підпросторів простору X , $I_F : F \rightarrow X$ – оператор вкладення, $I_F^* : X^* \rightarrow F^*$ – спряжений оператор. Для кожного $F \in \aleph(X)$ розглянемо відображення $A_F : F \rightarrow F^*$, яке визначається комутативною діаграмою:

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{A(\cdot, u)} & X^* \\ \uparrow I_F & & \downarrow I_F^* \\ F & \xrightarrow{A_F} & F^* \end{array}$$

тобто $A_F(\cdot) = I_F^* A(\cdot, u) I_F$.

Для кожного $F \in \aleph(X)$ покладемо $\bar{A}_F(\cdot) = \overline{I_F^* \text{co}A(\cdot, u)} : F \rightarrow 2^{F^*} \setminus \{\emptyset\}$. Покажемо, що відображення $\bar{A}_F(\cdot) = \overline{\text{co}}A_F(\cdot)$ набуває опуклих компактних значень. Останнє випливає із скінченновимірної локальної обмеженості відображення $X \ni y \rightarrow A(y, u)$ та із справедливості рівності $\overline{\text{co}}I_F^* A(y, u) = I_F^* \overline{\text{co}}A(y, u) \quad \forall y \in F$, яка доводиться в [14].

Далі покажемо, що відображення $\bar{A}_F(\cdot) = \overline{I_F^* \text{co}A(\cdot, u)} : F \rightarrow 2^{F^*} \setminus \{\emptyset\}$ є напівнеперервним зверху. Множина $\bar{A}_F(x)$ обмежена, а значить, компактна в F^* . Припустимо, що в точці $x_0 \in F$ відображення \bar{A}_F не є напівнеперервним зверху. Тоді знайдеться $\varepsilon > 0$, таке, що

$$B_{\frac{1}{n}}(x_0) = \left\{ x \in F : \|x - x_0\|_F < \frac{1}{n} \right\}$$

можна вибрати точку x_n , таку, що

$$\begin{aligned} & \overline{A}_F(x_n) \not\subset B_\varepsilon(\overline{A}_F(x_0)) = \\ & = \{z \in F^* \mid \text{dist}(z, \overline{A}_F(x_0)) < \varepsilon\}. \end{aligned}$$

Розглянемо послідовності $\{x_n\}$, $\{z_n\}$, де $z_n \in \overline{A}_F(x_n) \setminus B_\varepsilon(\overline{A}_F(x_0))$, $x_n \in B_{\frac{1}{n}}(x_0)$. Послідовність x_n збігається до x_0 в F , а послідовність z_n обмежена в силу обмеженості відображення \overline{A}_F . Не втрачаючи загальності, можемо вважати, що $z_n \rightarrow z_0$ в F^* . Згідно з твердженням 3 відображення A демізамкнене, звідки впливає замкненість \overline{A}_F . Тому $z_0 \in \overline{A}_F(x_0)$, що суперечить умові $z_n \notin B_\varepsilon(\overline{A}_F(x_0))$.

Для кожного $F \in \mathfrak{N}(X)$ покладемо $\overline{B}_{r,F} = \overline{B}_r \cap F$, де \overline{B}_r – замкнена куля радіуса r з центром у нулі в просторі X . Тоді

$$[\overline{A}_F(y) - f_F, y]_+ = [A(y, u) - f, y]_+ \geq 0 \quad \forall y \in \partial \overline{B}_{r,F},$$

де $f_F = I_F^* f$.

Отже, для відображення $\overline{A}_F(\cdot) - f_F$ застосуємо наслідок із [14], з якого випливає, що $\forall F \in \mathfrak{N}(X) \exists y_F \in \overline{B}_{r,F}$, таке, що

$$\overline{A}_F(y_F) \ni f_F. \tag{4}$$

В силу твердження з [14] останнє включення еквівалентно нерівності

$$[\overline{A}_F(y_F), w]_+ \geq \langle f_F, w \rangle_F \quad \forall w \in F. \tag{5}$$

Для довільного $F_0 \in \mathfrak{N}(X)$ покладемо

$$G_{F_0} = \bigcup_{F \supset F_0} \{y_F \in \overline{B}_{r,F} \mid y_F \text{ задовольняє (5)}\}.$$

Очевидно, множина G_{F_0} непорожня і міститься в кулі \overline{B}_r . Крім того, для довільного скінченного набору $F_1, \dots, F_n \in \mathfrak{N}(X)$ і $F \in \mathfrak{N}(X)$

$$\text{таких, що } \bigcup_{i=1}^n F_i \subset F, \text{ маємо } \emptyset \neq G_F \subset \bigcap_{i=1}^n G_{F_i}.$$

Таким чином, система множин $\{\overline{G}_F^w\}$ центрована, де \overline{G}_F^w – слабке замикання множини

G_F в X і згідно з теоремою Банаха–Алаоглу для кожного $F \in \mathfrak{N}(X)$ \overline{G}_F^w – компакт у слабкій топології простору X . Отже, маємо $\bigcap_{F \in \mathfrak{N}(X)} \overline{G}_F^w \neq \emptyset$.

Розглянемо $y_0 \in \bigcap_{F \in \mathfrak{N}(X)} \overline{G}_F^w$, зафіксуємо довільне $w \in X$ та виберемо $F_0 \in \mathfrak{N}(X)$ з умови $y_0, w \in F_0$. Тоді знайдеться підпослідовність $\{y_n\} \in G_{F_0}$, яка слабко збігається до y_0 в просторі X , а також $d'_n \in \overline{A}_{F_n}(y_n)$ ($d'_n = f'_n$), де $y_n \in \overline{B}_r \cap F_n$, $F_0 \subset F_n \in \mathfrak{N}(X)$, $f_n = I_{F_n}^* f$. У такому випадку отримаємо

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \langle d_n, y_n - y_0 \rangle_X &= \lim_{n \rightarrow \infty} \langle d'_n, y_n - y_0 \rangle_{F_n} = \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \langle f_n, y_n - y_0 \rangle_{F_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \langle f, y_n - y_0 \rangle_X = 0, \end{aligned}$$

де $d'_n = I_{F_n}^* d_n$, $d_n \in \overline{\text{co}}A(y_n, u)$. Звідси, зокрема, випливає, що послідовність $\{\langle d_n, y_n \rangle_X\}_{n \geq 1}$ обмежена зверху. Враховуючи, що відображення $X \ni y \rightarrow A(y, u)$ задовольняє властивість (П), згідно з теоремою Банаха–Алаоглу можемо вважати, що з точністю до підпослідовності $d_n \rightarrow d$ *-слабко в X^* . Оскільки відображення A задовольняє властивість \overline{S}_k , то $d \in \overline{\text{co}}A(y_0, u)$. Далі маємо

$$\begin{aligned} \langle d, w \rangle_X &= \lim_{n \rightarrow \infty} \langle d_n, w \rangle_X = \lim_{n \rightarrow \infty} \langle d'_n, w \rangle_{F_n} = \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \langle f_n, w \rangle_{F_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \langle f, w \rangle_X. \end{aligned}$$

З довільного вибору $w \in X$ випливає, що $d = f$, а це і доводить, що множина $K(u, f)$ є непорожньою.

Нехай тепер $U \ni u_n \rightarrow u \in U$ *-слабко в Y^* , $f_n \rightarrow f$ сильно в X^* . Перевіримо справедливість включення (2). Припустимо, що множина $\bigcap_{n \geq 1} \bigcup_{m \geq n} \overline{K(u_m, f_m)}^w$ є непорожньою (в іншому випадку включення (2), очевидно, виконується).

Тоді якщо $y_0 \in \bigcap_{n \geq 1} \bigcup_{m \geq n} \overline{K(u_m, f_m)}^w$, то існує підпо-

слідовність натуральних чисел $\{n_k\}_{k \geq 1}$, така, що y_0 є слабкою границею в просторі X деякої послідовності $\{y_{n_k}\}_{k \geq 1}$, такої, що $\forall k \geq 1 \quad y_{n_k} \in K(u_{n_k}, f_{n_k})$. Відзначимо, що $\langle f_{n_k}, y_{n_k} - y_0 \rangle_X \rightarrow 0$ при $k \rightarrow \infty$. Тоді з властивості \bar{S}_k оператора A маємо $f \in A(y_0, u)$, тобто $y_0 \in K(u, f)$.

Слабка замкненість $K(u, f)$ впливає з (2). Теорему доведено.

Далі на конкретному прикладі покажемо, що властивість \bar{S}_k є принципово ширшою за властивість λ_0 -квазімонотонності. А саме розглянемо обмежене багатовзначне відображення $A : X \times U \rightarrow 2^{X^*} \setminus \{\emptyset\}$, яке задовольняє властивість (\bar{S}_k) , є +-коерцитивним для всіх $u \in U$, але ні для якого $u \in U$ не є --коерцитивним, не є λ_0 -квазімонотонним і $-A$ теж не є λ_0 -квазімонотонним.

Приклад. Нехай Ω – відкрита обмежена підмножина в \mathbb{R}^n ($n \geq 2$) з достатньо регулярною границею $\partial\Omega$ розмірності $n-1$. Нехай ξ_1, ξ_2 – задані функції з $L^\infty(\Omega)$, такі, що

$$0 < \beta \leq \xi_1(x) \leq \xi_2(x) \text{ майже скрізь (м.с.) в } \Omega.$$

Покладемо

$$U = \left\{ \mathcal{U} = [u_{ij}(x)]_{1 \leq i, j \leq n} \left| \begin{array}{l} u_{ji} = u_{ij} \in [L^\infty(\Omega)] \\ \forall i, j = 1, \dots, n, \\ \xi_1(x) \leq u_{ij}(x) \leq \xi_2(x) \text{ м.с.} \\ \text{в } \Omega, \forall i, j = 1, \dots, n, \\ (\eta, \mathcal{U}(x)\eta)_{\mathbb{R}^n} \geq \gamma \|\eta\|_{\mathbb{R}^n}^2 \\ \forall \eta \in \mathbb{R}^n, \text{ м.с. в } \Omega \end{array} \right. \right\},$$

де $\gamma > 0$. Вважатимемо, що U утворює порожню множину рівномірно обмежених та додатно означених симетричних квадратних матриць. Розглянемо множину

$$V = \{ \mathcal{U} = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_n] \in [L^\infty(\Omega)]^{n \times n} : \operatorname{div} \mathbf{u}_i = 0 \\ \forall i = 1, 2, \dots, n \},$$

де значення оператора div на векторі $\mathbf{u} \in [L^2(\Omega)]^n$ визначається як елемент простору $H^{-1}(\Omega)$, такий, що

$$\langle \operatorname{div} \mathbf{u}, \phi \rangle_{H_0^1(\Omega)} = - \int_{\Omega} (\mathbf{u}, \nabla \phi)_{\mathbb{R}^n} dx \quad \forall \phi \in H_0^1(\Omega).$$

Будемо вважати, що функціональний параметр $\mathcal{U} \in V \cap U$, де множина U означена вище. Множину всіх допустимих параметрів позначимо U_{sol} .

Нехай $X = H_0^1(\Omega)$ – дійсний простір Соболева, $Y = [L^1(\Omega)]^{n \times n}$. Тоді $X^* = H^{-1}(\Omega)$, $Y^* = [L^\infty(\Omega)]^{n \times n}$. Нехай $(u, v)_{L_2} = \int_{\Omega} u(x)v(x) dx$ – скалярний добуток в $L_2(\Omega)$; $((u, v)) = \int_{\Omega} \nabla u \cdot \nabla v dx$ – скалярний добуток в $H_0^1(\Omega)$, $u, v \in H_0^1(\Omega)$; $a \cdot b$ – скалярний добуток векторів $a, b \in \mathbb{R}^n$; $\|u\|_{H_0^1(\Omega)} = \sqrt{((u, u))}$, $u \in X$. Розглянемо оператор $A : X \times U_{\text{sol}} \rightarrow 2^{X^*} \setminus \{\emptyset\}$, який визначається за правилом

$$A(y, \mathcal{U}) = \{ -\operatorname{div}(\alpha \mathcal{U}(x) \nabla y) \mid \alpha \in [-1, 1] \} = \\ = \left\{ - \sum_{i,j=1}^n \alpha \frac{\partial}{\partial x_i} \left(u_{ij}(x) \frac{\partial y}{\partial x_j} \right) \mid \alpha \in [-1, 1] \right\}.$$

Зауважимо, що $\overline{\operatorname{co}} A(y, \mathcal{U}) = A(y, \mathcal{U}) = -A(y, \mathcal{U}) \quad \forall y \in X$.

Тепер покажемо, що оператор $A(y, \mathcal{U}) = -\operatorname{div}(\alpha \mathcal{U}(x) \nabla y)$ як відображення $A : H_0^1(\Omega) \times U_{\text{sol}} \rightarrow 2^{H^{-1}(\Omega)} \setminus \{\emptyset\}$ задовольняє умову \bar{S}_k . Для цього нам будуть потрібні такі допоміжні результати.

Лема 1. U_{sol} – секвенційно компактна множина в *-слабкій топології простору $[L^\infty(\Omega)]^{n \times n}$.

Доведення. Нехай $\{\mathcal{U}_k = [\mathbf{u}_{1k}, \mathbf{u}_{2k}, \dots, \mathbf{u}_{nk}]\}_{k=1}^\infty$ – довільна послідовність в U_{sol} . Оскільки $U_{\text{sol}} \subset U$, а множина U – секвенційно *-слабко компактна, то можна вважати, що існує матриця $\mathcal{U}_0 \in U$, така, що

$$\int_{\Omega} (\mathbf{u}_{ik}, \phi)_{\mathbb{R}^n} dx \rightarrow \int_{\Omega} (\mathbf{u}_{i0}, \phi)_{\mathbb{R}^n} dx \quad \forall \phi \in [L^1(\Omega)]^n, \\ \forall i = 1, 2, \dots, n.$$

Виберемо як вектор ϕ такий, що $\phi = \nabla p$, де $p \in H_0^1(\Omega)$. Оскільки

$$\int_{\Omega} (\mathbf{u}_{ik}, \nabla p)_{\mathbb{R}^n} dx = -\langle \operatorname{div} \mathbf{u}_{ik}, p \rangle_{H_0^1(\Omega)} = 0 \quad \forall k \in \mathbb{N},$$

то $\int_{\Omega} (\mathbf{u}_{i0}, \nabla p)_{\mathbb{R}^n} dx = -\langle \operatorname{div} \mathbf{u}_{i0}, p \rangle_{H_0^1(\Omega)} = 0$ для всіх $i = 1, 2, \dots, n$. Отже, маємо

$$\mathcal{U}_0 = [\mathbf{u}_{10}, \mathbf{u}_{20}, \dots, \mathbf{u}_{n0}] \in U_{\text{sol}},$$

що і треба було встановити.

Лема (про компенсовану компактність) [16].

Нехай p_k, p_0, v_k, v_0 — вектори з $[L^2(\Omega)]^n$, такі, що $p_k \rightarrow p_0$ і $v_k \rightarrow v_0$ слабо в $[L^2(\Omega)]^n$. Якщо при цьому послідовності $\{\operatorname{div} p_k\}_{k=1}^{\infty}$ і $\{\operatorname{rot} v_k\}_{k=1}^{\infty}$ є компактними в $H^{-1}(\Omega)$, то

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \int_{\Omega} (p_k, v_k)_{\mathbb{R}^n} \phi dx = \int_{\Omega} (p_0, v_0)_{\mathbb{R}^n} \phi dx \quad \forall \phi \in C_0^{\infty}(\Omega).$$

Тут для довільної вектор-функції $v \in (L^2(\Omega))^n$ елементи кососиметричної матриці $\operatorname{rot} v$ визначаються як елементи простору $H^{-1}(\Omega)$ за таким правилом:

$$\langle \operatorname{rot} v, \phi \rangle_{H^{-1}(\Omega)}^{ij} = -\int_{\Omega} \left(v_i \frac{\partial \phi}{\partial x_j} - v_j \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) dx$$

$$\forall \phi \in H_0^1(\Omega), \quad i, j = 1, \dots, n.$$

Покажемо, що оператор $A \in +$ -коерцитивним для кожного $\mathcal{U} \in U_{\text{sol}}$. Дійсно, ця властивість є безпосереднім наслідком нерівності $[A(y, \mathcal{U}), y]_{+} = \sup_{|\alpha| \leq 1} \alpha \langle -\operatorname{div}(\mathcal{U}(x)\nabla y), y \rangle \geq \gamma \|y\|_X^2 \quad \forall y \in X$. Крім того, A — рівномірно обмежений оператор в тому розумінні, що $\|A(y, \mathcal{U})\|_{+} \leq C \|y\|_X \quad \forall y \in X$, де $C = \|\xi_2(x)\|_{L^{\infty}(\Omega)}$, тобто константа C не залежить від $\mathcal{U} \in U_{\text{sol}}$, а залежить тільки від самої множини U_{sol} .

Зауваження 3. Для повноти характеристики оператора A необхідно зазначити, що ні для одного $\mathcal{U} \in U_{\text{sol}}$ оператор A не є --коерцитивним, оскільки $A(y, \mathcal{U}) = -A(y, \mathcal{U})$. Більше того, ні A , ні $-A$ не задовольняють власти-

вість λ_0 -квазімонотонності. Дійсно, розглянемо довільну ортонормовану систему векторів $\{y_k\}_{k=1}^{\infty}$ в $X = H_0^1(\Omega)$ та послідовність діагональних матриць $\{\mathcal{U}_k\}_{k=1}^{\infty}$, де $\mathcal{U}_k = \mathcal{U}^* \in U_{\text{sol}}$ — фіксований елемент $\forall k \geq 1$. Як відомо, $y_k \rightarrow \bar{0}$ слабо в X . Нехай

$$d_k = \operatorname{div}(\mathcal{U}_k(x)\nabla y_k) \in A(y_k, \mathcal{U}_k) \quad \forall k \geq 1.$$

Тоді з означення множини U_{sol} випливає, що

$$\langle d_k, y_k - \bar{0} \rangle \leq -\gamma \|y_k\|_X^2 = -\gamma < 0 \quad \forall k \geq 1.$$

Проте для довільної підпослідовності $\{y_m, \mathcal{U}_m, d_m\}_{m=1}^{\infty} \subset \{y_k, \mathcal{U}_k, d_k\}_{k=1}^{\infty}$ маємо

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \langle d_m, y_m - \bar{0} \rangle < 0 = [A(\bar{0}), \bar{0} - \bar{0}]_-.$$

І щоб показати, що $-A$ теж не є λ_0 -квазімонотонним оператором, лишається згадати, що $-A(y, \mathcal{U}) = A(y, \mathcal{U}) \quad \forall y \in X$.

Тепер встановимо основний результат, який стосується даного прикладу.

Теорема 2. Оператор A задовольняє властивість \bar{S}_k .

Доведення. Нехай $\{\mathcal{U}_k\}_{k=1}^{\infty}$ — послідовність в U_{sol} , така, що $\mathcal{U}_k \rightarrow \mathcal{U}_0$ *-слабо в $[L^{\infty}(\Omega)]^{n \times n}$. Оскільки множина U_{sol} секвенційно *-слабо замкнена, то $\mathcal{U}_0 \in U_{\text{sol}}$. Нехай $\{y_k\}_{k=1}^{\infty} \subset H_0^1(\Omega)$, така, що $y_k \rightarrow y_0$ *-слабо в $H_0^1(\Omega)$. І нехай також

$$l_k = -\alpha_k \operatorname{div}(\mathcal{U}_k(x)\nabla y_k) \in A(y_k, \mathcal{U}_k), \quad k \in \mathbb{N}, \alpha_k \in [-1, 1],$$

є послідовністю селекторів, такою, що $l_k \rightarrow l_0$ слабо в $H^{-1}(\Omega)$ і виконується умова

$$\langle l_k, y_k - y_0 \rangle_X \rightarrow 0.$$

Необхідно довести, що $l_0 \in A(y_0, \mathcal{U}_0)$. Є дві можливих альтернативи:

1) $\alpha_k \rightarrow 0$. Тоді з рівномірної обмеженості оператора $\operatorname{div}(\mathcal{U}_k(x)\nabla y_k)$ отримаємо, що

$l_n \rightarrow \bar{0}$ в $H^{-1}(\Omega)$, а $\bar{0} \in A(y_0, \mathcal{U}_0)$, що і треба було довести;

2) існує підпослідовність $\{\alpha_m\}_{m=1}^\infty \subset \{\alpha_k\}_{k=1}^\infty$, така, що $\alpha_k \rightarrow \alpha^* \in [-1, 1] \setminus \{0\}$.

Перейдемо до послідовності $d_m = \frac{l_m}{\alpha_m} = -\operatorname{div}(\mathcal{U}_m(x) \nabla y_m)$. Очевидно, що в цьому випадку $\langle d_m, y_m - y_0 \rangle_X \rightarrow 0$, $d_m \rightarrow d = -\operatorname{div}(\xi)$ слабо в $H^{-1}(\Omega)$, де ξ є слабкою границею послідовності $\{\mathcal{U}_m \nabla y_m\}_{m=1}^\infty$ в просторі $[L^2(\Omega)]^n$. Дійсно, для довільного $\phi \in H_0^1(\Omega)$ маємо

$$\begin{aligned} \langle -\operatorname{div}(\mathcal{U}_k \nabla y_k), \phi \rangle_{H_0^1(\Omega)} &= \int_{\Omega} (\mathcal{U}_k \nabla y_k, \nabla \phi)_{\mathbb{R}^n} dx \rightarrow \\ &\rightarrow \int_{\Omega} (\xi, \nabla \phi)_{\mathbb{R}^n} dx = \langle -\operatorname{div} \xi, \phi \rangle_{H_0^1(\Omega)} = \langle d, \phi \rangle_{H_0^1(\Omega)}. \end{aligned}$$

Покажемо, що в цьому випадку має місце тотожність

$$\xi \equiv \mathcal{U}_0 \nabla y_0. \quad (6)$$

Якщо це так, то $l_m \rightarrow \alpha^* d = -\operatorname{div}(\alpha^* \mathcal{U}_0(x) \nabla y_0) \in A(y_0, \mathcal{U}_0)$.

Тепер встановимо тотожність (6). Для цього скористаємось лемою про компенсовану компактність. Покладемо $p_k = \mathbf{u}_{ik}$, $p_0 = \mathbf{u}_{i0}$, $v_k = \nabla y_k$, $v_0 = \nabla y_0$. Оскільки $\operatorname{div} p_k = 0$ і $\operatorname{rot} v_k = 0 \quad \forall k \in \mathbb{N}$, $\nabla y_k \rightarrow \nabla y_0$ слабо в $[L^2(\Omega)]^n$ і $\mathcal{U}_k \rightarrow \mathcal{U}_0$ *-слабо в $[L^\infty(\Omega)]^{n \times n}$, а отже, слабо в $[L^2(\Omega)]^{n \times n}$, то

$$\begin{aligned} \lim_{k \rightarrow \infty} \int_{\Omega} (\mathcal{U}_k \nabla y_k, \phi)_{\mathbb{R}^n} dx &= \sum_{i=1}^n \lim_{k \rightarrow \infty} \int_{\Omega} (\mathbf{u}_{ik}, \nabla y_k)_{\mathbb{R}^n} \phi_i dx = \\ &= \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} (\mathbf{u}_{i0}, \nabla y_0)_{\mathbb{R}^n} \phi_i dx = \int_{\Omega} (\mathcal{U}_0 \nabla y_0, \phi)_{\mathbb{R}^n} dx \\ &\quad \forall \phi \in [C_0^\infty(\Omega)]^n. \end{aligned}$$

Оскільки $C_0^\infty(\Omega)$ щільно в $L^1(\Omega)$, то $\mathcal{U}_k \nabla y_k \rightarrow \xi = \mathcal{U}_0 \nabla y_0$ *-слабо в $[L^\infty(\Omega)]^n$, що і треба було встановити. Теорему доведено.

Висновки

Розглянута в статті властивість \bar{S}_k для многозначного випадку значно розширює клас λ_0 -квазімонотонних відображень. Наведений приклад показує, що існують оператори, які задовольняють властивості \bar{S}_k і +-коерцитивності, але які не є λ_0 -квазімонотонними і --коерцитивними. Основний результат статті дає можливість стверджувати існування розв'язків параметризованих включень із подібними відображеннями і є узагальненням відомих результатів, які для такого класу операторів не застосовуються. Також показано залежність множин розв'язків таких включень від параметрів. У подальших дослідженнях було б доцільним поширити отримані результати на випадок варіаційних нерівностей.

В.О. Капустян, П.О. Касьянов, О.П. Когут

СВОЙСТВА РЕШЕНИЙ КЛАССА ПАРАМЕТРИЗИРОВАННЫХ ОПЕРАТОРНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Исследуются свойства решений параметризованных операторных включений с многозначными операторами типа \bar{S}_k . Доказана теорема о разрешимости таких включений, слабой компактности и зависимости от параметра множеств их решений. Приведен пример, иллюстрирующий полученные результаты.

V.O. Kapustyan, P.O. Kasyanov, O.P. Kogut

SOLUTIONS PROPERTIES FOR ONE CLASS OF PARAMETERIZED OPERATOR INCLUSIONS

This paper provides the insights into the properties of solutions for parameterized operator inclusions with multi-valued maps of \bar{S}_k type. We prove the resolvability of such inclusions, weak compactness and parameter dependence of their solution. Moreover, we provide the example, illustrating the obtained results.

1. *Чикрий А.А.* Конфликтно управляемые процессы. – К.: Наук. думка, 1992. – 382 с.
2. *Лионс Дж.-Л.* Некоторые методы решения нелинейных краевых задач. – М.: Мир, 1972. – 588 с.
3. *Гаевский Х., Грегер К., Захариас К.* Нелинейные операторные уравнения и операторные дифференциальные уравнения. – М.: Мир, 1978. – 336с.
4. *Скрытник И.В.* Методы исследования эллиптических краевых задач. – М.: Наука, 1990. – 442 с.
5. *Згуровский М.З., Мельник В.С.* Метод штрафа для вариационных неравенств с многозначными отображениями. I // Кибернетика и системный анализ. – 2000. – № 4. – С. 57–69.
6. *Згуровский М.З., Мельник В.С.* Неравенство Ки Фаня и операторные включения в банаховых пространствах // Там же. – 2002. – № 2. – С. 70–85.
7. *Згуровский М.З., Мельник В.С.* Нелинейный анализ и управление бесконечномерными системами. – К.: Наук. думка, 1999. – 630 с.
8. *Згуровский М.З., Мельник В.С., Новиков А.Н.* Прикладные методы анализа и управления нелинейными процессами и полями. – К.: Наук. думка, 2004. – 590 с.
9. *Мельник В.С.* О критических точках некоторых классов многозначных отображений // Кибернетика и системный анализ. – 1997. – № 2. – С. 87–98.
10. *Мельник В.С.* Мультивариационные неравенства и операторные включения в банаховых пространствах с отображениями класса // Укр. мат. журн. – 2000. – 52, № 11. – С. 1513–1523.
11. *Мельник В.С.* Топологические методы в теории операторных включений в банаховых пространствах // Там же. – 2006. – 58, № 4. – С. 505–521.
12. *Иваненко В.И., Мельник В.С.* Вариационные методы в задачах управления для систем с распределенными параметрами. – К.: Наук. думка, 1988. – 324 с.
13. *Касьянов П.О., Мельник В.С.* Метод Фаедо–Гальорки-на для дифференциально-операторных W_{λ_0} -включений в банаховых просторах з відображеннями псевдомонотонного типу // Зб. праць Ін-ту математики НАН України. – 2005. – 2, № 1. – С. 103–126.
14. *Kasyanov P.O., Mel'nik V.S., Yasinsky V.V.* Evolution inclusions and inequalities in Banach spaces with W_{λ} -pseudomonotone maps. – К.: Наук. думка, 2007. – 308 с.
15. *Жиков В.В., Козлов С.М., Олейник О.Л.* Усреднение дифференциальных операторов. – М.: Физматлит, 1993. – 456 с.

Рекомендована Радою
Фізико-технічного інституту
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
6 березня 2008 року

УДК 571.986

М.М. Кухарчук, М.І. Яременко

РОЗВ'ЯЗНІСТЬ ОДНОГО КЛАСИЧНОГО ЛІНІЙНОГО ЕЛІПТИЧНОГО ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО РІВНЯННЯ ДРУГОГО ПОРЯДКУ**Вступ**

Лінійне еліптичне диференціальне рівняння другого порядку розглядалося в працях багатьох учених. Для нього А.Д. Александров [1] знайшов оцінку за нормою C розв'язків задачі Діріхле через норму f в L_p .

У даній статті ми одержали результати щодо існування і єдиності розв'язку в $W_1^2(R^l, d^l x)$ та $W_1^p(R^l, d^l x)$ цього рівняння за досить загальних умов на коефіцієнти.

Підхід, запропонований у даній статті, також може бути використаний для розгляду, коли дане еліптичне рівняння буде містити нелінійні члени [2, 3].

Постановка задачі

Мета статті – довести існування і єдиність розв'язку еліптичного диференціального рівняння за умови виконання певних обмежень.

В основі доведення розв'язності цього рівняння лежить метод форм з подальшим використанням теореми Мінті–Браудера.

Дослідження еліптичного диференціального рівняння (1) за умов (2)

Розглянемо диференціальне рівняння

$$\lambda u - d \circ a \circ du + da \circ du + b \circ du = f, \quad \lambda > 0, \quad (1)$$

за таких умов:

$$\xi^2 \leq \xi \circ a \circ \xi, \quad \lambda > \lambda_0, \quad N\sqrt{\beta} < 1, \quad (2)$$

$$\text{де } N = \langle c \circ a^{-1} \circ c \rangle^{\frac{1}{2}}; \quad c = da + b; \quad \lambda_0 = \frac{NC(\beta)}{2\sqrt{\beta}}.$$

Введемо простір

$$W_1^2(R^l, d^l x) = \{v | v \in L^2(R^l, d^l x), D_i v \in L^2(R^l, d^l x), \\ i = 1, \dots, l\},$$

$$\|v\|_{W_1^2(R^l, d^l x)} = \|v\|_{L^2(R^l, d^l x)} + \sum_i \|D_i v\|_{L^2(R^l, d^l x)},$$

де $W_{1,0}^2(R^l, d^l x) = \{v | v \in W_1^2(R^l, d^l x) \text{ і має компактний носій}\}$; $W_{-1}^2(R^l, d^l x)$ – спряжений до $W_{1,0}^2(R^l, d^l x)$ простір.

Визначимо форму $h_\lambda^2(u, v)$, покладаючи

$$h_\lambda^2(u, v) = \lambda \langle u, v \rangle + \langle dv \circ a \circ du \rangle + \langle (da \circ du + b \circ du), v \rangle,$$

$$D(h_\lambda^2) = \{u \in W_1^2 : |h_\lambda^2(u, v)| < \infty\}.$$

Покажемо, що існує оператор $A_\lambda^2(\cdot) : W_1^2(R^l, d^l x) \rightarrow W_{-1}^2(R^l, d^l x)$, такий, що $h_\lambda^2(u, v) = \langle A_\lambda^2(u), v \rangle$.

Лема 1. Якщо структура рівняння (1) задовольняє умови (2), то форма, породжена цим рівнянням, обмежена.

Доведення. Дійсно, мають місце оцінки

$$\begin{aligned} h_\lambda^2(u, v) &= \lambda \langle u, v \rangle + \langle dv \circ a \circ du \rangle + \\ &+ \langle (da \circ du + b \circ du), v \rangle \leq \lambda \|u\|_2 \|v\|_2 + \langle dv \circ a \circ du \rangle + \\ &+ |\langle (da + b) \circ du, v \rangle|, \quad da + b = c, \quad |\langle c \circ du, u \rangle| \leq \\ &\leq \langle c \circ a^{-1} \circ c \rangle^{\frac{1}{2}} \langle du \circ a \circ du \rangle^{\frac{1}{2}} \|u\|_2 \leq \\ &\leq \langle c \circ a^{-1} \circ c \rangle^{\frac{1}{2}} \langle du \circ a \circ du \rangle^{\frac{1}{2}} \times \\ &\times (\beta \langle du \circ a \circ du \rangle + C(\beta) \|u\|_2^2)^{\frac{1}{2}} \leq \\ &\leq \frac{\langle c \circ a^{-1} \circ c \rangle^{\frac{1}{2}}}{2} \left(\left(\varepsilon + \frac{\beta}{\varepsilon} \right) \langle du \circ a \circ du \rangle + \frac{C(\beta)}{\varepsilon} \|u\|_2^2 \right). \end{aligned}$$

Тоді одержимо

$$\begin{aligned} |h_\lambda^2(u, v)| \leq |h_\lambda^2(u, u)| &\leq \left[\lambda + \frac{\langle c \circ a^{-1} \circ c \rangle^{\frac{1}{2}} C(\beta)}{2\varepsilon} \right] \|u\|_2^2 + \\ &+ \left[1 + \frac{\langle c \circ a^{-1} \circ c \rangle^{\frac{1}{2}}}{2} \left(\varepsilon + \frac{\beta}{\varepsilon} \right) \right] \langle du \circ a \circ du \rangle. \end{aligned}$$

Нехай $\varepsilon = \sqrt{\beta}$, $\langle c \circ a^{-1} \circ c \rangle^{\frac{1}{2}} = N$. Тоді матимемо

$$|h_\lambda^2(u, v)| \leq |h_\lambda^2(u, u)| \leq \left(\lambda + \frac{NC(\beta)}{2\sqrt{\beta}} \right) \|u\|_2^2 + (1 + N\sqrt{\beta}) \langle du \circ a \circ du \rangle.$$

Отже, форма $h_\lambda^2(u, v)$ обмежена, лема доведена.

Лема 2. Форма $h_\lambda^2(u, v)$ породжує обмежений коерцитивний оператор і є правильною формула $A_\lambda^2(\cdot) : W_1^2(R^l, d^l x) \rightarrow W_{-1}^2(R^l, d^l x)$ і

$$\|A_\lambda^2(u)\|_{W_{-1}^2} = \sup_{v \in W_1^2} \frac{h_\lambda^2(u, v)}{\|v\|_{W_1^2}}.$$

Доведення. За означенням, оператор $A_\lambda^2(\cdot) : W_1^2(R^l, d^l x) \rightarrow W_{-1}^2(R^l, d^l x)$ коерцитивний, якщо виконується нерівність

$$\begin{aligned} & \lim_{\|u\|_{W_1^2} \rightarrow \infty} \frac{h_\lambda^2(u)}{\|u\|_{W_1^2}} \geq \\ & \geq \lim_{\|u\|_{W_1^2} \rightarrow \infty} \frac{(\lambda - \lambda_0) \|u\|_2^2 + (1 - N\sqrt{\beta}) \langle du \circ a \circ du \rangle}{\|u\|_{W_1^2}} \geq \\ & \leq \lim_{\|u\|_{W_1^2} \rightarrow \infty} \frac{(\lambda - \lambda_0) \|u\|_2^2 + (1 - N\sqrt{\beta}) \|\nabla u\|_2^2}{(\|u\|_2^2 + \|\nabla u\|_2^2)^{\frac{1}{2}}} = \infty, \end{aligned}$$

де A_λ^2 – коерцитивне відображення.

Лема 3. Оператор $A_\lambda^2(\cdot) : W_1^2(R^l, d^l x) \rightarrow W_{-1}^2(R^l, d^l x)$ – строго монотонне відображення.

Доведення. Означення монотонності має вигляд

$$\langle A_\lambda^2(u) - A_\lambda^2(v), (u - v) \rangle \geq 0 \quad \forall u, v \in W_1^2,$$

$$\langle A_\lambda^2(u) - A_\lambda^2(v), (u - v) \rangle \geq \lambda \|u - v\|_2^2 - \lambda_0 \|u - v\|_2^2 + (1 - N\sqrt{\beta}) \|\nabla(u - v)\|_2^2 \quad \text{при } 0 < \beta < 1, \lambda > \lambda_0,$$

тобто $\langle A_\lambda^2(u) - A_\lambda^2(v), (u - v) \rangle = 0 \Leftrightarrow u = v \quad \forall u, v \in W_1^2$.

Отже, оператор $A_\lambda^2(\cdot) : W_1^2(R^l, d^l x) \rightarrow W_{-1}^2(R^l, d^l x)$ строго монотонний.

Лема 4. Оператор $A_\lambda^2(\cdot) : W_1^2(R^l, d^l x) \rightarrow W_{-1}^2(R^l, d^l x)$ є хемінеперервним відображенням, тобто

$$\langle A_\lambda^2(u + tw) - A_\lambda^2(u), v \rangle \rightarrow 0, \quad t \rightarrow 0.$$

$$\forall u, w \in W_1^2(R^l, d^l x), \quad v \in W_{1,0}^2(R^l, d^l x).$$

Доведення. Безпосередньо одержуємо $|\langle A_\lambda^2(u + tw) - A_\lambda^2(u), v \rangle| \geq t |\langle w, v \rangle| + t |\langle dv \circ a \circ dw \rangle| + t |\langle (da \circ dw + b \circ dw), v \rangle| \rightarrow 0, \quad t \rightarrow 0,$

$$\forall u, w \in W_1^2(R^l, d^l x), \quad \forall v \in W_{1,0}^2(R^l, d^l x).$$

Лема доведена.

Теорема 1. Рівняння (1) за умов (2) має єдиний розв'язок, який належить $W_1^2(R^l, d^l x)$.

Доведення. Доведення полягає в перевірці виконання умов теореми Мінті–Браудера (див. теорему 2.1 із [5, с. 182]).

Внаслідок лем 1–4 оператор A_λ^2 , породжений формою $h_\lambda^2(u, v)$, умови цієї теореми задовольняє.

Розглянемо звуження оператора A_λ^2 на множину $u \in W_1^2(R^l, d^l x)$, таких, що $A_\lambda^2(u) \in L_2(R^l)$ і визначимо оператор $\tilde{A}_\lambda^2(u) \equiv A_\lambda^2(u)$ для

$$u \in D(\tilde{A}_\lambda^2) = \{u \in W_1^2(R^l, d^l x) | A_\lambda^2(u) \in L_2(R^l)\}.$$

Теорема 2. Оператор $\tilde{A}_\lambda^2 : D(\tilde{A}_\lambda^2) \rightarrow L_2(R^l)$ – сюр'єктивне відображення.

Доведення. Оскільки область значень оператора A_λ^2 збігається з простором $W_{-1}^2(R^l, d^l x)$ і вкладення $W_1^2(R^l, d^l x) \subset L_2(R^l) \subset W_{-1}^2(R^l, d^l x)$ є неперервним і щільним, то одержуємо, що $\tilde{A}_\lambda^2 : D(\tilde{A}_\lambda^2) \rightarrow L_2(R^l)$ – сюр'єктивне відображення. Це означає, що рівняння $\tilde{A}_\lambda^2(u) = f \quad \forall f \in L_2(R^l)$ має розв'язок, який належить до множини області визначення оператора A_λ^2 , або, що те саме, рівняння $(\lambda - d \circ a \circ d + da \circ d + b \circ d)u = f \quad \forall f \in L_2(R^l)$ має узагальнений роз-

в'язок у множині області визначення оператора \tilde{A}_λ^2 , яка є підмножиною множини $W_1^2(R^l, d^l x)$.

Внаслідок того, що оператор $A_\lambda^2 : W_1^2(R^l, d^l x) \rightarrow W_{-1}^2(R^l, d^l x)$ є монотонним, то оператор $\tilde{A}_\lambda^2 : D(\tilde{A}_\lambda^2) \rightarrow L_2(R^l)$ є максимальним монотонним відображенням, що в свою чергу гарантує єдиність розв'язку, а отже, оператор $\tilde{A}_\lambda^2 : D(\tilde{A}_\lambda^2) \rightarrow L_2(R^l)$ є генератором напівгрупи стиску типу C_0 . Таким чином, маємо, що операторною реалізацією диференціального виразу $(\lambda - d \circ a \circ d + da \circ d + b \circ d)u$, $u \in D(\tilde{A}_\lambda^2)$, при наших умовах є оператор $\tilde{A}_\lambda^2 : D(\tilde{A}_\lambda^2) \rightarrow L_2(R^l)$. Теорема доведена.

Перейдемо до розгляду рівняння (1) у шкалі просторів $W_1^p(R^l, d^l x)$.

Простір $W_1^p(R^l, d^l x)$ введемо як $W_1^p(R^l, d^l x) =: \{v | v \in L^p(R^l, d^l x), D_i v \in L^p(R^l, d^l x), i = 1, \dots, l\}$,

$$\|v\|_{W_1^p(R^l, d^l x)} = \|v\|_{L^p(R^l, d^l x)} + \sum_i \|D_i v\|_{L^p(R^l, d^l x)},$$

де $W_{1,0}^p(R^l, d^l x) =: \{v | v \in W_1^p(R^l, d^l x) \text{ і має компактний носій}\}$; $W_{-1}^p(R^l, d^l x)$ — спряжений простір до простору $W_{1,0}^p(R^l, d^l x)$.

Визначимо форму $h_\lambda^p(u, v)$, покладаючи

$$h_\lambda^p(u, v) = \lambda \langle u, v \rangle + \langle dv \circ a \circ du \rangle + \langle (da \circ du + b \circ du), v \rangle.$$

Лема 5. Якщо структура рівняння (1) задовольняє наведені раніше умови (2), то форма, породжена цим рівнянням, обмежена.

Доведення. Дійсно, можемо оцінити

$$h_\lambda^p(u, v) = (\lambda \langle u, v \rangle + \langle dv \circ a \circ du \rangle + \langle (da \circ du + b \circ du), v \rangle) \leq \lambda \|u\|_p \|v\|_q + \langle dv \circ a \circ du \rangle + |\langle (da + b) \circ du, v \rangle|, \quad da + b = c.$$

Введемо позначення $W \equiv u |u|^{\frac{p-2}{2}}$. Тоді матимемо

$$\begin{aligned} |\langle c \circ du, u |u|^{p-2} \rangle| &\leq \\ &\leq \frac{2}{p} \langle c \circ a^{-1} \circ c \rangle^{\frac{1}{2}} \langle dW \circ a \circ dW \rangle^{\frac{1}{2}} \|W\|_2 \leq \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\leq \frac{2}{p} \langle c \circ a^{-1} \circ c \rangle^{\frac{1}{2}} \langle dW \circ a \circ dW \rangle^{\frac{1}{2}} (\beta \langle dW \circ a \circ dW \rangle + \\ &\quad + C(\beta) \|W\|_2^2)^{\frac{1}{2}} \leq \frac{\langle c \circ a^{-1} \circ c \rangle^{\frac{1}{2}}}{p} \times \\ &\quad \times \left(\left(\varepsilon + \frac{\beta}{\varepsilon} \right) \langle dW \circ a \circ dW \rangle + \frac{C(\beta)}{\varepsilon} \|W\|_2^2 \right), \\ |h_\lambda^p(u, v)| &\leq |h_\lambda^p(u, u |u|^{p-2})| \leq \left(\lambda + \frac{\langle c \circ a^{-1} \circ c \rangle^{\frac{1}{2}} C(\beta)}{p \varepsilon} \right) \times \\ &\quad \times \|W\|_2^2 + \left(\frac{4(p-1)}{p^2} + \frac{\langle c \circ a^{-1} \circ c \rangle^{\frac{1}{2}}}{p} \left(\varepsilon + \frac{\beta}{\varepsilon} \right) \right) \|\nabla W\|_2^2. \end{aligned}$$

Нехай $\varepsilon = \sqrt{\beta}$, $\frac{1}{p} \langle c \circ a^{-1} \circ c \rangle^{\frac{1}{2}} = N$. Тоді маємо

$$\begin{aligned} |h_\lambda^p(u, v)| &\leq |h_\lambda^p(u, u |u|^{p-2})| \leq \\ &\leq \left(\lambda + \frac{NC(\beta)}{p\sqrt{\beta}} \right) \|W\|_2^2 + \left(u \frac{p-1}{p^2} + N\sqrt{\beta} \right) \|\nabla W\|_2^2, \end{aligned}$$

а отже, форма $h_\lambda^p(u, v)$ обмежена. Лема доведена.

Лема 6. Форма $h_\lambda^p(u, v)$ породжує обмежений коерцитивний оператор

$$A_\lambda^p(\cdot) : W_1^p(R^l, d^l x) \rightarrow W_{-1}^p(R^l, d^l x),$$

$$\|A_\lambda^p(u)\|_{W_{-1}^p} = \sup_{v \in W_1^q} \frac{h_\lambda^p(u, v)}{\|v\|_{W_1^q}}.$$

Доведення. Згідно з означенням коерцитивності, маємо

$$\begin{aligned} \lim_{\|u |u|^{p-2}\|_{W_1^q} \rightarrow \infty} \frac{h_\lambda^p(u, u |u|^{p-2})}{\|u |u|^{p-2}\|_{W_1^q}} &\geq \\ &(\lambda - \lambda_0) \|W\|_2^2 + \\ &+ \left(u \frac{p-2}{p^2} N\sqrt{\beta} \right) \|\nabla W\|_2^2 \\ &\geq \lim_{\|u |u|^{p-2}\|_{W_1^q} \rightarrow \infty} \frac{\|W\|_2^q + \frac{2}{q} \|W\|_2^{q-1} \|\nabla W\|_2}{\|W\|_2^q} = \infty, \end{aligned}$$

тобто оператор A_λ^p — коерцитивне відображення.

Лема 7. Оператор $A_\lambda^p(\cdot) : W_1^p(R^l, d^l x) \rightarrow W_{-1}^p(R^l, d^l x)$ є хемінеперервним відображенням, тобто

$$\langle A_\lambda^p(u + tw) - A_\lambda^p(u), v \rangle \rightarrow 0 \text{ при}$$

$$t \rightarrow 0 \quad \forall u, w \in W_1^p(R^l, d^l x), \quad \forall v \in W_{1,0}^q(R^l, d^l x).$$

Доведення. За визначенням, оператор $A_\lambda^p : W_1^p(R^l, d^l x) \rightarrow W_{-1}^p(R^l, d^l x)$ – хемінеперервне відображення, якщо $\forall u, w \in W_1^p(R^l, d^l x)$ $w - \lim_{t \rightarrow 0} A_\lambda^p(u + tw) = A_\lambda^p(u)$ в нормі $W_{-1}^p(R^l, d^l x)$.

Отже, матимемо

$$|\langle A_\lambda^p(u + tw) - A_\lambda^p(u), v \rangle| \geq t|\langle w, v \rangle| + t|\langle dv \circ a \circ dw \rangle| + t|\langle (da \circ d\omega + b \circ dw), v \rangle| \rightarrow 0 \text{ при } t \rightarrow 0$$

$$\forall u, w \in W_1^p(R^l, d^l x), \quad \forall v \in W_{1,0}^q(R^l, d^l x).$$

Лема доведена.

Лема 8. Оператор $A_\lambda^p(\cdot) : W_1^p(R^l, d^l x) \rightarrow W_{-1}^p(R^l, d^l x)$ – акритивне відображення в просторі $L_p(R^l)$.

Доведення. За означенням, оператор $A_\lambda^p(\cdot) : W_1^p(R^l, d^l x) \rightarrow W_{-1}^p(R^l, d^l x)$ акритивний у $L_p(R^l)$, якщо $\langle \tilde{A}_\lambda^p(u) - \tilde{A}_\lambda^p(v), (u - v)|u - v|^{p-2} \rangle \geq 0 \quad \forall u, v \in W_1^p$. Отже, маємо

$$\langle \tilde{A}_\lambda^p(u) - \tilde{A}_\lambda^p(v), (u - v)|u - v|^{p-2} \rangle \geq ((\lambda - \lambda_0) \|W\|_2^2 + \left(\frac{4(p-1)}{p^2} - N\sqrt{\beta} \right) \|\nabla W\|_2^2, \text{ при } 0 < \beta < \frac{16}{N} \left(\frac{p-1}{p^2} \right)^2$$

$$\text{і } \lambda > \lambda_0,$$

де $W \equiv (u - v)|u - v|^{\frac{p-2}{2}}$, тобто

$$\langle \tilde{A}_\lambda^p(u) - \tilde{A}_\lambda^p(v), (u - v)|u - v|^{p-2} \rangle = 0$$

$$\Leftrightarrow u = v \quad \forall u, v \in W_1^p.$$

Оператор $A_\lambda^p(\cdot)$ строго акритивний в L_p .

Лема доведена.

Доведемо аналог теореми 2. Для цього розглянемо звуження оператора A_λ^p на множину $u \in W_1^p(R^l, d^l x)$, таких, що $A_\lambda^p(u) \in L_p(R^l)$, і визначимо оператор $\tilde{A}_\lambda^p(u) \equiv A_\lambda^p(u)$ для

$$u \in D(\tilde{A}_\lambda^p) = \{u \in W_1^p(R^l, d^l x) | A_\lambda^p(u) \in L_p(R^l)\}.$$

Теорема 3. Оператор $\tilde{A}_\lambda^p : D(\tilde{A}_\lambda^p) \rightarrow L_p(R^l)$ – сюр'єктивне відображення.

Доведення. Оскільки область значень оператора A_λ^p збігається з простором $W_{-1}^p(R^l, d^l x)$ і вкладення $W_1^p(R^l, d^l x) \subset L_p(R^l) \subset W_{-1}^p(R^l, d^l x)$ є неперервним і щільним, то одержуємо, що $\tilde{A}_\lambda^p : D(\tilde{A}_\lambda^p) \rightarrow L_p(R^l)$ – сюр'єктивне відображення. Це означає, що рівняння $\tilde{A}_\lambda^p(u) = f \quad \forall f \in L_p(R^l)$ має розв'язок, який належить до множини області визначення оператора A_λ^p , або, що те саме, рівняння $(\lambda - d \circ a \circ d + da \circ d + b \circ d)u = f \quad \forall f \in L_p(R^l)$ має узагальнений розв'язок в множині області визначення оператора \tilde{A}_λ^p , яка є підмножиною множини $W_1^p(R^l, d^l x)$.

Внаслідок того, що відображення $A_\lambda^p : W_1^p(R^l, d^l x) \rightarrow W_{-1}^p(R^l, d^l x)$ є акритивним, то відображення $\tilde{A}_\lambda^p : D(\tilde{A}_\lambda^p) \rightarrow L_p(R^l)$ є максимальним акритивним відображенням, що гарантує єдиність розв'язку, а отже, оператор $\tilde{A}_\lambda^p : D(\tilde{A}_\lambda^p) \rightarrow L_p(R^l)$ є генератором напівгрупи стиску типу C_0 . Отже, маємо, що операторною реалізацією диференціального виразу $(\lambda - d \circ a \circ d + da \circ d + b \circ d)u, u \in D(\tilde{A}_\lambda^p)$ при наших умовах є оператор $\tilde{A}_\lambda^p : D(\tilde{A}_\lambda^p) \rightarrow L_p(R^l)$. Теорема 3 доведена.

Взагалі кажучи, доведених лем 5–8 недостатньо для доведення існування єдиності розв'язку рівняння (1) – необхідні ще деякі додаткові умови.

Висновки

У статті вперше використано метод форм для доведення розв'язності рівняння (1) за умов (2), тобто виконуються умови теореми

Мінті–Браудера для оператора, породженого формою, складеною за лівою частиною нашого рівняння. Крім того, показано, що цей оператор є генератором напівгрупи стиску.

Н.М. Кухарчук, Н.И. Яременко

РАЗРЕШИМОСТЬ ОДНОГО КЛАССИЧЕСКОГО ЛИНЕЙНОГО ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Исследовано линейное эллиптическое уравнение во всем евклидовом пространстве R^l , $l \geq 3$. Получены результаты о существовании и единственности решений таких уравнений.

M.M. Kukharchuk, M.I. Yaremenko

ON SOLVABILITY OF ONE CLASSICAL LINEAR ELLIPTICAL DIFFERENTIAL SECOND-ORDER EQUATION

The paper outlines the investigation of the linear elliptic equations on the whole Euclidean space R^l , $l \geq 3$. We obtain some results on the existence and uniqueness of the solutions of these equations.

1. *Условия единственности и оценки решения задачи Дирихле // Вести ЛГУ. Сер. Математика, механика, астрономия. – 1963. – № 13, вып. 3. – С. 5–29.*
2. *Кухарчук М.М. Про розв'язність квазілінійних еліптичних рівнянь другого порядку в R^l // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2004. – № 2. – С. 145–158.*
3. *Кухарчук Н.М. Разрешимость квазилинейных эллиптических уравнений второго порядка с умеренными медленно растущими коэффициентами в пространствах $W_1^p(R^l, d^l x)$, $p \geq 2, l \geq 3$. – К., 1988. – (Препринт. АН УССР, Ин-т математики). – 52 с.*

Рекомендована Радою
фізико-математичного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
1 жовтня 2007 року

УДК 517.938: 534.23

О.Ю. Швець, В.А. Печерний

РІЗНОМАНІТНІСТЬ СЦЕНАРІЇВ ПЕРЕХОДУ ДО ХАОСУ В ДЕТЕРМІНОВАНІЙ СИСТЕМІ ГЕНЕРАТОР–П'ЄЗОКЕРАМІЧНИЙ ВИПРОМІНЮВАЧ

Вступ

При вивченні детермінованого хаосу важливе значення має встановлення сценарію переходу від регулярного режиму досліджуваної динамічної системи до хаотичного. Незважаючи на велику різноманітність реальних динамічних систем на даний момент описано всього три основних типи сценаріїв переходу до детермінованого хаосу. Це – сценарій Фейгенбаума [1, 2], перехід до хаосу через переміжність за Помо–Манневіллем [3, 4] і перехід до хаосу через руйнування квазіперіодичних атракторів [5, 6]. У реальних динамічних системах, в яких існують хаотичні атрактори, виконується, як правило, один, рідше – два з перелічених вище сценаріїв переходу до хаосу. Системи, в яких перехід до хаосу відбувається за всіма основними сценаріями, трапляються рідко. Тому виявлення і вивчення їх є однією з важливих задач нелінійної динаміки.

У даній статті вивчається детермінована динамічна система генератор–п'єзокерамічний випромінювач, яка є прикладом неідеальної електропружної системи. Під неідеальними динамічними системами розуміють системи, в яких потужність джерела збудження коливань порівняна з потужністю, спожитою коливальним навантаженням. Функціонування таких систем описується за допомогою теорії Зоммерфельда–Кононенка [7]. У статті також аналізуються ефекти взаємодії, названі в сукупності ефектом Зоммерфельда–Кононенка, коливань електропружної системи з обмеженим збудженням. Проведені нами дослідження є продовженням і розвитком досліджень, розпочатих у публікаціях [8–11].

Постановка задачі

Головна мета статті – визначення всіх основних типів сценаріїв переходу до хаосу, які реалізуються в детермінованій системі генератор–п'єзокерамічний випромінювач. Для роз-

в'язання такої задачі будується карта динамічних режимів, на основі якої досліджуються особливості встановлення регулярних і хаотичних атракторів у досліджуваній системі.

Математична модель системи

Коливання електропружних тіл у більшості праць розглядається в так званій ідеальній постановці. За такої постановки питання про вплив п'єзокерамічного тіла на пристрій збудження коливань, наприклад генератор напруги, не вивчається. Проте зміна електричного поля в генераторі при дисипації енергії може призводити до нерегулярних динамічних режимів, які зумовлені “чутливістю” сукупної системи. Це випадок обмеженого або неідеального збудження, коли потужність задавального пристрою порівняна з випроміненою або спожитою п'єзокерамічним тілом енергією при деформаціях.

У даній статті як модельна досліджується електропружна динамічна система, утворена стрижневим п'єзокерамічним випромінювачем, який збуджується електроламповим генератором обмеженої потужності. Такий вибір модельної системи зумовлений насамперед сучасним відродженням лампових аналогових пристроїв, які забезпечують більш високі метрологічні характеристики, ніж цифрові пристрої. Для електропружних систем з обмеженим збудженням іншого виду порядок проведення даного дослідження повністю зберігатиметься, а отримані результати будуть аналогічними отриманим у даній статті.

У працях [8–11] наведено детальний опис детермінованої динамічної системи генератор–п'єзокерамічний випромінювач та побудовано її математичну модель. Цю математичну модель можна записати за допомогою такої системи нелінійних диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} \ddot{\phi} + \omega_0^2 \phi &= a_0 \dot{\phi} + a_2 \dot{\phi}^2 - a_3 \dot{\phi}^3 - a_4 V(t), \\ \ddot{V}(t) + \omega_1^2 V(t) &= a_5 \phi + a_6 \dot{\phi} - a_7 \dot{V}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

де ϕ – змінна, пропорційна сітковій напрузі лампи генератора; V – електрична напруга, яка прикладається до електродів випромінювача. Параметри системи визначаються через електромагнітні, геометричні і деформаційні характеристики системи генератор–п'єзокерамічний випромінювач за такими формулами [8–11]:

$$\omega_0^2 = \frac{R_a + R_k}{R_a L_k C_k}, \quad \omega_1^2 = \frac{2h}{LS\varepsilon_{33}(1-k^2)},$$

$$a_0 = a_1 - \frac{M^2 R_c}{L_c C_c L R_a^2},$$

$$a_1 = \frac{M_c}{L_c C_c} \left[I_1 - \frac{R_c R_a C_c - L_c}{R_a (M_c - D L_c)} + \frac{R_c L_1}{R_a^2 M_c} - 3I_3 (E_g)^2 \right],$$

$$a_2 = 3 \frac{M_c I_3 E_g}{L_c C_c}, \quad a_3 = \frac{M_c I_3}{L_c C_c}, \quad a_4 = \frac{2 M M_c}{L R_a L_c C_c},$$

$$a_5 = -\frac{M \omega_1^2 R_c (R_a + R_c)}{2 M_c R_a L_c}, \quad a_6 = -\frac{M \omega_1^2 R_c}{2 M_c R_a},$$

$$a_7 = \frac{k^2}{\eta_0 h S (1 - k^2)}.$$

Детальне пояснення значення наведених вище параметрів дано у [8–11]. В них показано, що принципова можливість виникнення хаотичних режимів у системі зумовлена пов'язаністю процесів у випромінювачі і генераторі. Якщо знехтувати зворотним впливом коливань випромінювача на функціонування генератора ($a_4 = 0$), тобто знехтувати ефектом Зомерфельда–Кононенка, то система рівнянь (1) розпадеться на два рівняння, кожне з яких має розмірність фазового простору, що дорівнює двом. Перше з рівнянь є автоколивальним і може бути розв'язане незалежно від другого. Друге рівняння, що описує коливальні процеси в стрижні, взагалі є лінійним. В такому випадку можливі атрактори системи рівнянь (1) завжди регулярні. Тому і функціонування генератора, і випромінювання хвиль випромінювачем в акустичне середовище будуть відповідати регулярним процесам.

Якщо ж $a_4 \neq 0$, то розмірність фазового простору системи рівнянь (1) буде дорівнювати чотирьом. В такому випадку в системі можуть існувати як регулярні, так і хаотичні атрактори [6]. Отже, принципова можливість існування хаотичних режимів функціонування генератора та збудження хаотичних коливань зумовлена ефектом Зомерфельда–Кононенка [7].

Для визначення можливих усталених динамічних режимів взаємодії в системі (1) введемо безрозмірні змінні:

$$\xi = \frac{\phi \omega_0}{E_g}, \quad \frac{d\xi}{d\tau} = \zeta, \quad \beta = \frac{V}{E_g}, \quad \frac{d\beta}{d\tau} = \gamma, \quad \tau = \omega_0 t.$$

Тоді система рівнянь (1) запишеться у вигляді

$$\begin{aligned} \frac{d\xi}{d\tau} &= \zeta, \\ \frac{d\zeta}{d\tau} &= -\xi + \alpha_1 \zeta + \alpha_2 \zeta^2 - \alpha_3 \zeta^3 - \alpha_4 \beta, \\ \frac{d\beta}{d\tau} &= \gamma, \\ \frac{d\gamma}{d\tau} &= -\alpha_0 \beta + \alpha_5 \xi + \alpha_6 \zeta - \alpha_7 \gamma, \end{aligned} \quad (2)$$

де ξ, ζ – змінні, що описують функціонування генератора; β, γ – змінні, пропорційні вихідному сигналу випромінювача; $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_7$ – коефіцієнти:

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= \frac{\omega_1^2}{\omega_0^2}, \quad \alpha_1 = \frac{a_0}{\omega_0}, \quad \alpha_2 = \frac{a_2 E_g}{\omega_0}, \quad \alpha_3 = \frac{a_3 E_g^2}{\omega_0}, \\ \alpha_4 &= \frac{a_4}{\omega_0}, \quad \alpha_5 = \frac{a_5}{\omega_0^2}, \quad \alpha_6 = \frac{a_6}{\omega_0^2}, \quad \alpha_7 = \frac{a_7}{\omega_0}. \end{aligned}$$

Як показано в працях [8–11], система (2) є дисипативною. При виконанні умови $\alpha_0 \neq -a_4 a_5$ вона має єдине положення рівноваги ($\xi = 0, \zeta = 0, \beta = 0, \gamma = 0$), для якого визначені достатні умови асимптотичної стійкості [8–11]. При втраті стійкості цим положенням рівноваги всі траєкторії системи (2), які стартують з околу початку координат фазового простору, згодом залишать цей окіл і в результаті дисипативності системи прямуватимуть до деяких граничних множин і атракторів, які можуть бути як регулярними, так і хаотичними.

Побудова карти динамічних режимів

У теоретичних і експериментальних дослідженнях динамічних систем важливим етапом є побудова карти динамічних режимів. Реальні системи, як правило, мають два й більше параметрів, зміна значень яких веде до встановлення певних динамічних режимів. В такому випадку достатньо повне уявлення про поведінку системи на області допустимих значень параметрів можна дістати з карти динамічних режимів, що являє собою діаграму на площині, на осях якої відкладено довільні два параметри

системи (біфуркаційні параметри) та вказано області усталених динамічних режимів різних типів. Використання таких карт при вивченні особливостей динаміки реальних коливальних систем дає змогу отримати більш загальні та повні результати [6].

На основі практичних критеріїв існування детермінованого хаосу [5] розроблено методику побудови карти динамічних режимів. Головна ідея такої методики полягає в діагностиці режимів взаємодії, які встановлюються між генератором і випромінювачем, на деякій множині значень біфуркаційних параметрів. Для встановлення типів атракторів, що виникають при зміні значень параметрів системи, використовується аналіз спектра ляпуновських характеристичних показників (ЛХП). При цьому особливо ретельно аналізуються границі областей на карті між динамічними режимами різних типів. Щоб точніше діагностувати тип усталеного режиму робиться також аналіз спектральних густин, перерізів та відображень Пуанкаре.

Оскільки система (2) є нелінійною системою диференціальних рівнянь четвертого порядку, то всі її дослідження проводились за допомогою чисельних методів за методикою, розробленою у [8–11]. Основним розрахунковим методом, який використовується при побудові розв'язків системи рівнянь (2), є метод Рунне–Кутти п'ятого порядку із застосуванням коригуючих формул Дормана–Принса для змінного кроку інтегрування [12]. Локальна точність цього методу задається на рівні, не менше $O(10^{-7})$. При визначенні спектра ЛХП вико-

ристовується модифікований алгоритм Бенеттіна [13, 14], для побудови спектральної густини атракторів – метод Файлона [15], а для побудови перерізів та відображень Пуанкаре – метод Ено [16].

При побудові карти динамічних режимів для параметрів системи (2) покладалося: $\alpha_0 = 0,995$, $\alpha_1 = 0,04$, $\alpha_2 = 0,63X$, $\alpha_3 = 0,18X$, $0 \leq \alpha_4 \leq 0,4$, $\alpha_5 = -0,0604$, $\alpha_6 = -0,12$, $\alpha_7 = 0,01$, де X – безрозмірний множник, який залежить від робочих характеристик лампи генератора. Зауважимо, що такі значення коефіцієнтів відповідають реальним характеристикам LC -генераторів і п'єзокерамічних випромінювачів [9]. Як біфуркаційні вибрано параметр α_4 , який характеризує взаємозв'язок генератора з випромінювачем, і X . При таких умовах у системи (2) існує єдине нульове положення рівноваги, яке є нестійким за Ляпуновим [8–11].

На рис. 1, а наведено отриманий у результаті аналізу і обробки даних багаточисельних комп'ютерних експериментів один із листів карти динамічних режимів системи генератор–п'єзокерамічний випромінювач.

На рис. 1, а білі області карти відповідають тим значенням α_4 і X , для яких атракторами системи (2) будуть граничні цикли із сигнатурою спектра ЛХП вигляду $\langle 0, -, -, - \rangle$, сірі – відповідають квазіперіодичним атракторам із сигнатурою спектра ЛХП вигляду $\langle 0, 0, -, - \rangle$ і, нарешті, чорні області – хаотичним атракторам із сигнатурою спектра ЛХП вигляду $\langle +, 0, -, - \rangle$. З ри-

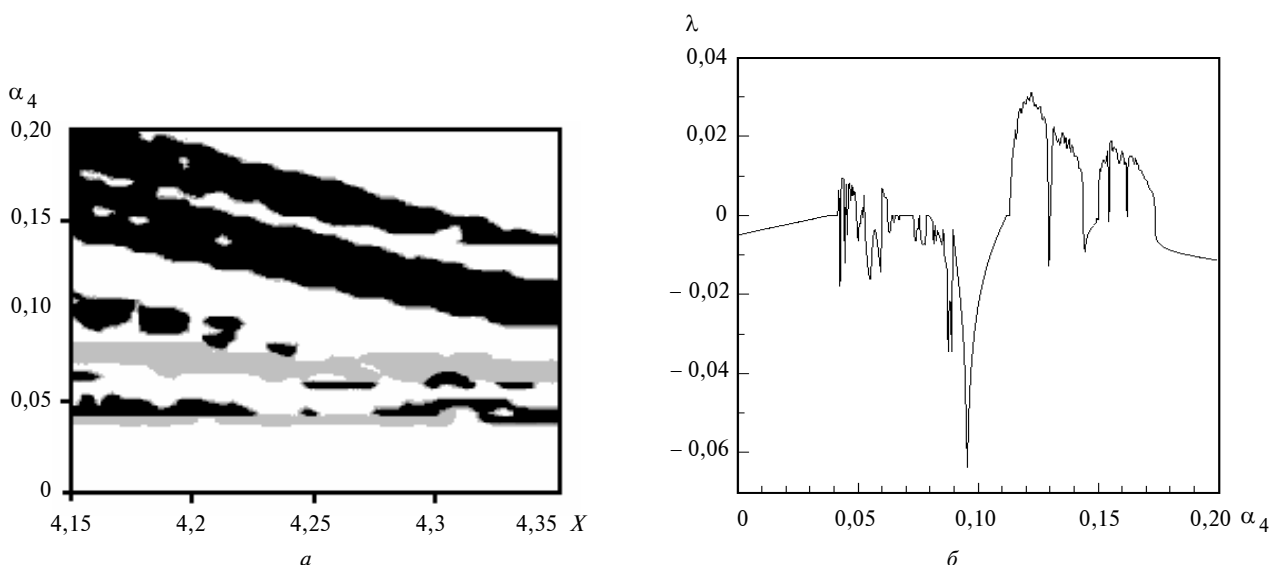


Рис. 1. Карта динамічних режимів (а) і графік залежності ляпуновського характеристичного показника від параметра α_4

сунка видно, що в області існування хаотичних атракторів врізаються невеликі за площею області існування граничних циклів. Це так звані вікна періодичності [5]. Особливо слід підкреслити, що вдалося виявити області існування квазіперіодичних атракторів, яких не знаходили в усіх попередніх дослідженнях цієї системи.

Для детальнішого дослідження атракторів системи, які виникають при зміні біфуркаційних параметрів, зробимо переріз листа карти (рис. 1, *a*) по вертикальній осі $X = 4,25$. Особливу увагу приділимо виникненню усталених хаотичних режимів та визначенню сценаріїв переходу до хаосу. На рис. 1, *b* побудовано графік залежності ляпуновських показників системи від параметра α_4 . При цьому на графіку нанесено значення ляпуновський показників згідно з таким правилом: якщо старший показник при відповідному значенні α_4 додатний, то на графіку нанесено його значення, якщо ж старший показник нульовий, а другий не дорівнює нулю, то на графік наносилось значення другого показника, а коли перший і другий показники дорівнювали нулю, то на графік ставилось нульове значення λ . Як відомо [5, 6], додатність старшого ляпуновського показника є основним практичним критерієм наявності хаосу в системі. З рисунка видно, що існує ряд інтервалів значень параметра α_4 , при яких старший характеристичний показник додатний. Дані інтервали відповідають чорним областям карти динамічних режимів (рис. 1, *a*), в яких у системі існують хаотичні атрактори. При більш уважному розгляді рис. 1, *b* можна помітити інтервали, в яких графік проходить по прямій $\lambda = 0$. Такі інтервали відповідають квазіперіодичним атракторам системи (2) (сірі області на рис. 1, *a*).

Як видно з рис. 1, коли $\alpha_4 \in [0,113; 0,2]$, в системі існують два інтервали, в яких вона має хаотичні атрактори. Було встановлено, що перехід від регулярного періодичного режиму до хаотичного здійснюється за сценарієм Фейгенбаума та через переміжність першого типу за Помо–Маннвіллем [5]. Оскільки перехід до хаосу через переміжність детально описаний у публікаціях [8–11], зупинимось на реалізації сценарію Фейгенбаума. При значенні $\alpha_4 = 0,15$ в системі існує стійкий граничний цикл із сиг-

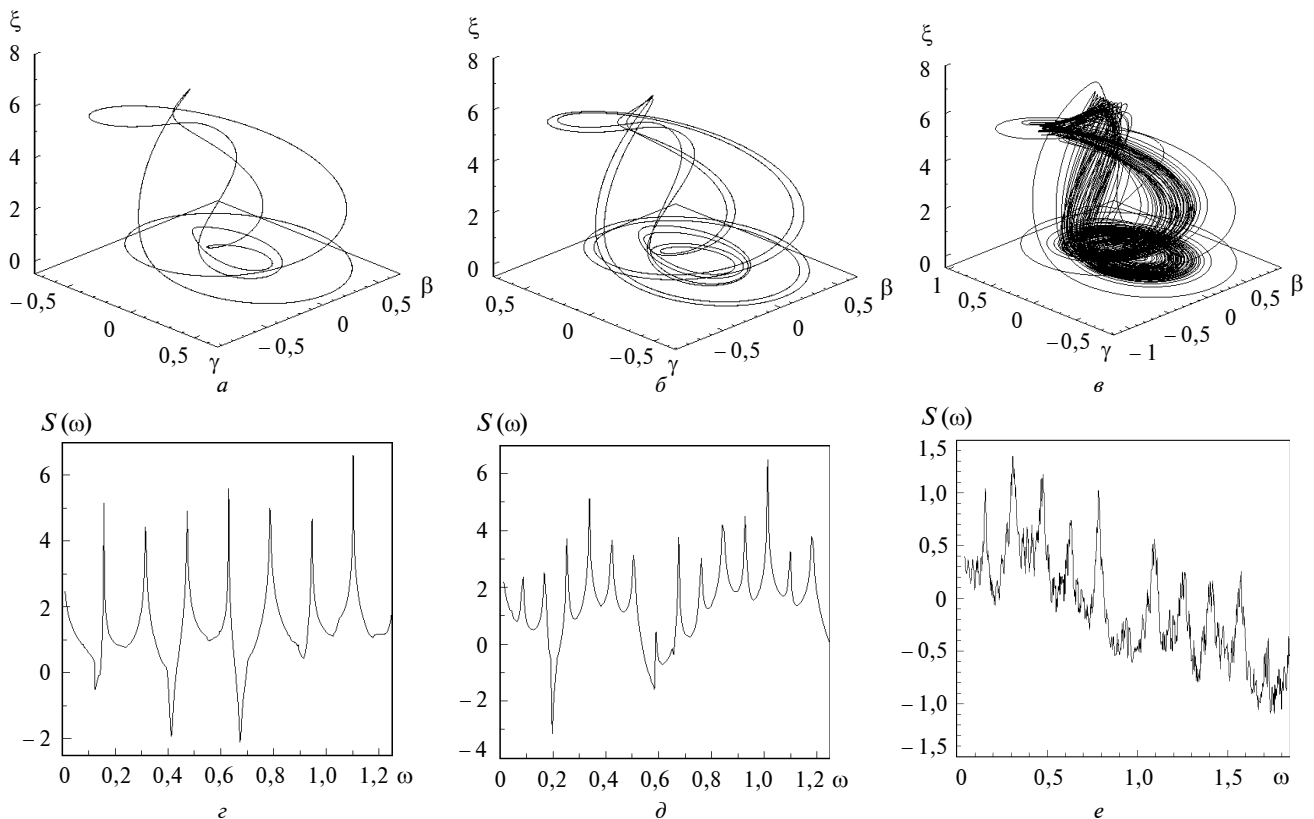


Рис. 2. Перехід до хаосу за сценарієм Фейгенбаума. Проекції фазових портретів (*a–в*) і Фур'є-спектри (*г–е*) біфуркацій подвоєння

натурою спектра ЛХП $\langle 0, -, -, - \rangle$. Проекцію фазового портрета такого циклу наведено на рис. 2, *а*. Починаючи із значення $\alpha_4 = 0,148$ в системі розпочинається нескінченний каскад біфуркацій подвоєння періоду. Першу біфуркацію цього каскаду наведено на рис. 2, *б*. Чітко помітно подвоєння тактності нового циклу. Цей нескінченний каскад завершується виникненням хаотичного атратора при $\alpha_4 = 0,143$. Проекцію фазового портрета хаотичного атратора наведено на рис. 2, *в*. Виниклий хаотичний атратор має сигнатуру спектра ЛХП вигляду $\langle +, 0, -, - \rangle$, тобто він є хаотичним, але не гіперхаотичним [11].

На рис. 2, *г-е* наведено розподіли спектральної густини (Фур'є-спектри) відповідно граничного циклу, першої біфуркації подвоєння періоду і хаотичного атратора. Для граничних циклів спектри є дискретними і рівномірними. Чітко можна побачити подвоєння числа спектральних піків у розподілі спектральної густини циклу з рис. 2, *б* порівняно з циклом із рис. 2, *а*. Фур'є-спектр хаотичного атратора

(рис. 2, *в*) є неперервним, що також свідчить про його нерегулярність. Таким чином, тут відбувається перехід до хаосу за сценарієм Фейгенбаума.

При $\alpha_4 = 0,1125$ хаотичний атратор зникає і в системі виникає стійкий 1-тактний граничний цикл дуже простої структури, сигнатура спектра ЛХП якого має вигляд $\langle 0, -, -, - \rangle$. На рис. 3, *а* побудовано проекцію фазового портрета граничного циклу такого типу при $\alpha_4 = 0,08$. Відзначимо, що спостерігається помітне зменшення фазового об'єму області, в якій локалізуються граничні цикли порівняно з об'ємом області локалізації циклів, розглянутих раніше (див. рис. 2). Цикли, подібні зображеному на рис. 3, *а*, існують у системі (2) при зміні параметра α_4 в інтервалі $(0,07; 0,1125)$.

При зменшенні значення α_4 , а саме при $\alpha_4 = 0,07$, існуючий граничний цикл втрачає свою стійкість і внаслідок біфуркації Неймарка в його околі виникає квазіперіодичний атратор – тороїдальна поверхня [5]. Сигнатура спектра виниклого квазіперіодичного атратора

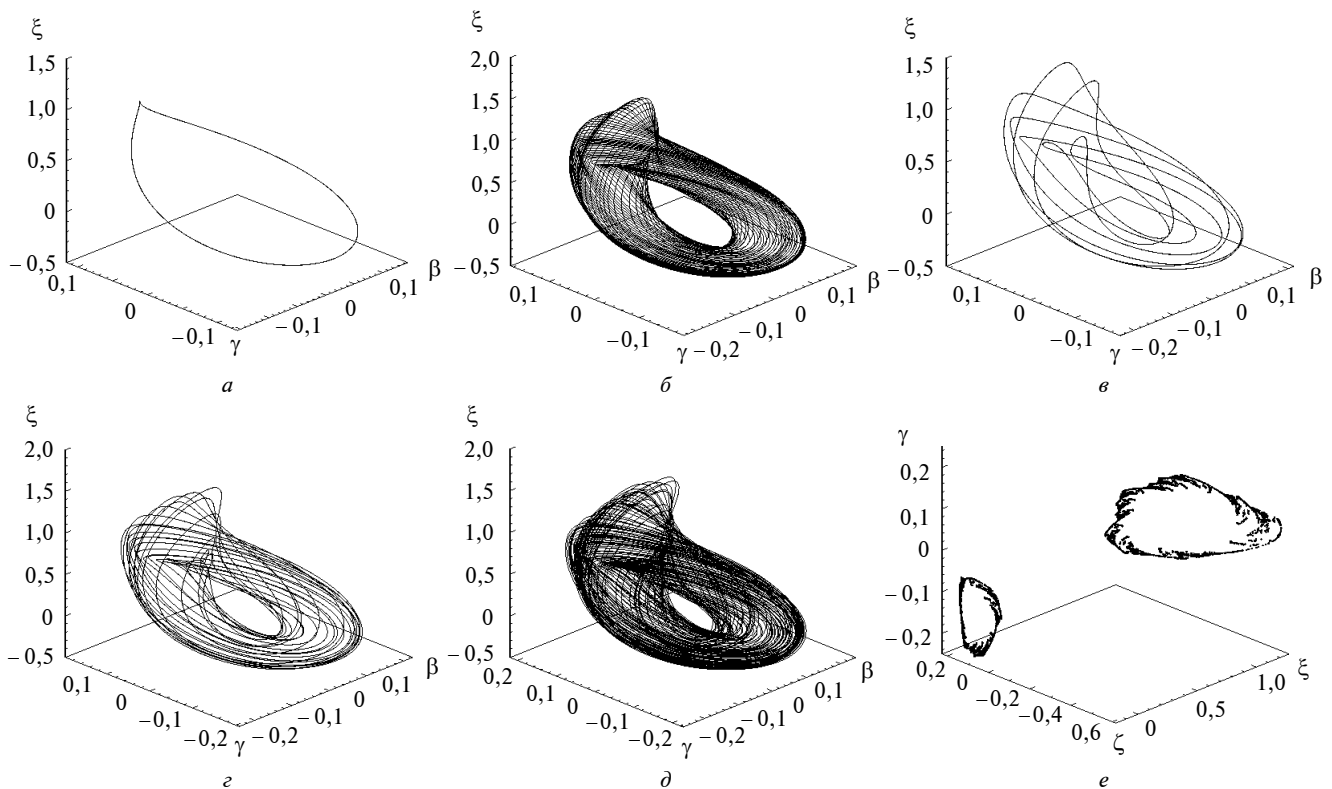


Рис. 3. Проекції фазових портретів граничних циклів при $\alpha_4 = 0,08$ (*а*); $\alpha_4 = 0,067$ (*б*); $\alpha_4 = 0,065$ (*в*); квазіперіодичного атратора при $\alpha_4 = 0,068$ (*г*); хаотичного атратора при $\alpha_4 = 0,0619$ (*д*) та переріз Пуанкаре площиною $\beta = 0$ хаотичного атратора при $\alpha_4 = 0,0619$ (*е*)

має вигляд $\langle 0, 0, -, - \rangle$. На рис. 3, б наведено проєкцію фазового портрета квазіперіодичного атратора системи при $\alpha_4 = 0,068$. Траєкторії системи всюди щільно покривають тороїдальну поверхню. При цьому вони залишаються регулярними і з деяким майже періодом повертаються в окіл зниклого граничного циклу. При подальшому зменшенні α_4 спостережуваний тор руйнується і в системі виникає хаотичний атратор. Переходу від квазіперіодичного до хаотичного режиму передують типові в такому випадку явища синхронізації (ефекти захоплення частоти) [6]. Вдалося встановити, що при $\alpha_4 = 0,067$ (рис. 3, в) і $\alpha_4 = 0,065$ (рис. 3, г) в системі виникає резонанс. Траєкторія, зробивши скінченну кількість обертів на поверхні тора, замикається і утворює складний, але періодичний рух – резонансний граничний цикл на торі. Отже, спостерігається реалізація сценарію переходу до хаосу через квазіперіодичні режими [5].

На рис. 3, д, е наведено відповідно проєкцію фазового портрета хаотичного атратора при $\alpha_4 = 0,0619$ та його переріз Пуанкаре площиною $\beta = 0$. У даному випадку, як і для квазіперіодичних атраторів, має місце нескінченне повернення траєкторії в окіл довільної точки хаотичного атратора. При цьому на відміну від регулярних атраторів моменти часу повернення траєкторії являє собою деяку хаотичну послідовність. Сигнатура спектра ЛХП виниклого хаотичного атратора має вигляд $\langle +, 0, -, - \rangle$. Тому його ляпуновська розмірність виражається дробовою величиною та знаходиться

в інтервалі $(2,3)$. Переріз Пуанкаре являє собою деяку розвинену хаотичну точкову множину, кількість точок якої збільшується із зростанням часу чисельного інтегрування. Хаотичні атратори такого типу існують у системі (2) в невеликому околі точки $\alpha_4 = 0,061$. При подальшому зменшенні α_4 в системі знову виникає стійкий граничний цикл.

На рис. 4, а–в наведено Фур'є-спектри розглянутих вище граничного циклу, квазіперіодичного та хаотичного атраторів. На всіх цих рисунках спостерігається картина, типова для Фур'є-спектрів атраторів різних типів. Так, Фур'є-спектр граничного циклу (рис. 4, а) дискретний, гармонічний, з рівновіддаленими спектральними піками. Відповідно спектр квазіперіодичного атратора (рис. 4, б) залишається дискретним, але при цьому втрачається його гармонічність. На відміну від спектрів регулярних атраторів Фур'є-спектр хаотичного атратора (рис. 4, в) є неперервним. Але слід звернути увагу на наявність чітких піків у неперервному спектрі хаотичного атратора. Це, умовно кажучи, “спогад” системи про зруйнований граничний тор, в околі якого виник хаотичний атратор.

Відзначимо, що в раніше проведених дослідженнях цієї задачі [8–11] не вдалося виявити квазіперіодичні атратори. Зрозуміло, що не були виявлені сценарії переходу до хаосу, пов'язані з руйнуванням граничних торів. Також зазначимо, що хаотичний атратор, який існує в системі (2) в околі точки $\alpha_4 = 0,061$, помітно відрізняється від хаотичних атраторів, які виявлялися в цій системі раніше [8–11].

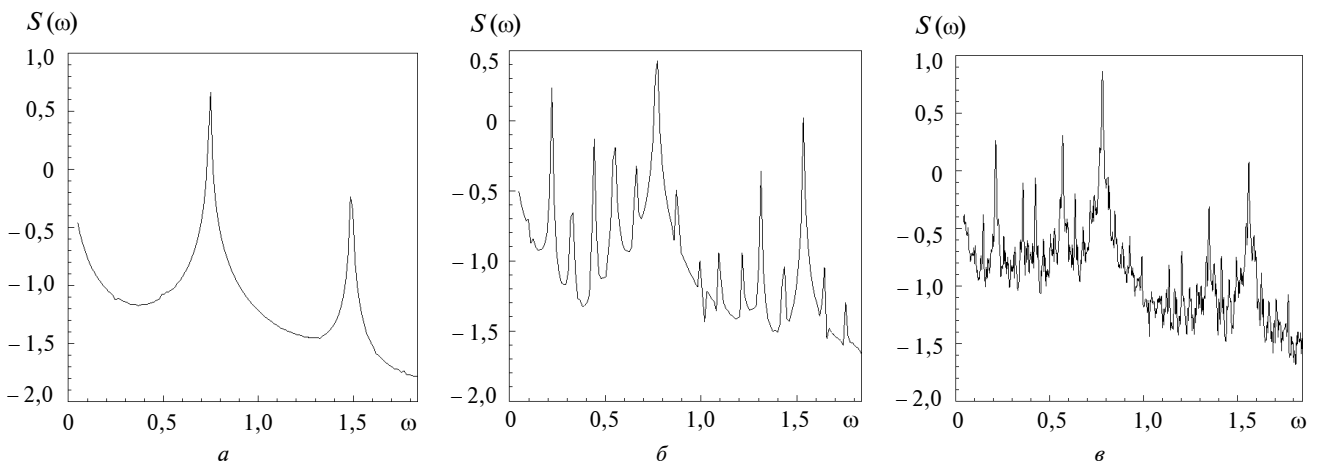


Рис. 4. Фур'є-спектри граничного циклу при $\alpha_4 = 0,08$ (а), квазіперіодичного атратора при $\alpha_4 = 0,068$ (б) і хаотичного атратора при $\alpha_4 = 0,0619$ (в)

Він локалізується в значно меншому фазовому об'ємі та має менше за величиною значення старшого ляпуновського показника. Це означає, що траєкторії, приналежні такому хаотичному атрактору, "розбігаються" з меншою швидкістю. Також він має меншу ляпуновську розмірність. Спостерігаються помітні відмінності фазових портретів та перерізів Пуанкаре між описаним вище хаотичним атрактором та хаотичними атракторами, знайденими для цієї задачі раніше.

Аналогічний сценарій переходу до хаосу через руйнування граничних торів реалізується в системі (2) і в околі точки $\alpha_4 = 0,04$, де також виникають регулярні та хаотичні аттрактори, подібні зображенням на рис. 4. При вивченні динаміки системи вздовж інших перерізів карти динамічних режимів спостерігаються аналогічні типи регулярних та хаотичних аттракторів і, відповідно, такі ж сценарії переходу до хаосу.

Висновки

На основі аналізу побудованої в статті карти динамічних режимів встановлено, що в системі генератор–п'єзокерамічний випромінювач реалізуються всі основні сценарії нелінійної динаміки переходу до хаосу. В результаті дослідження усталених режимів взаємодії виявлено існування нових типів регулярних та хаотичних аттракторів системи.

Таким чином, детермінована система генератор–п'єзокерамічний випромінювач набуває значення тих небагатьох реальних систем нелінійної динаміки, які демонструють усе різноманіття сценаріїв переходу від регулярних режимів до хаотичних. Тим самим визначається і важливість подальших досліджень даної системи з метою встановлення нових особливостей реалізації загальної теорії детермінованого хаосу.

А.Ю. Швець, В.А. Печерный

РАЗНООБРАЗИЕ СЦЕНАРИЕВ ПЕРЕХОДА К ХАОСУ В ДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ ГЕНЕРАТОР–ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ

Рассмотрены сценарии переходов к хаосу в детерминированной динамической системе генератор–пьезокерамический излучатель. Показано, что системе присущи все основные сценарии переходов к хаосу. Построена и детально проанализирована карта динамических режимов системы. Тщательно изучены основные типы регулярных и хаотических аттракторов. Выявлено существование переходов к хаосу, связанное с разрушением квазипериодических аттракторов.

O.Yu. Shvets, V.A. Pechernyi

ON VARIETY OF SCENARIOS OF TRANSITION TO CHAOS IN DETERMINISTIC SYSTEM GENERATOR–PIEZOCERAMIC TRANSDUCER

This paper highlights the scenarios of transitions to chaos in deterministic dynamical system generator–piezoceramic transducer. Furthermore, we show that all basic scenarios of transitions to chaos are inherent in a system. We construct and analyze the map of dynamic regimes of a system. We study the basic types of the regular and chaotic attractors thoroughly. Our experiments show the existence of transitions to chaos with destruction of quasiperiodic attractors.

1. *Feigenbaum M.J.* Quantitative universality for a class of nonlinear transformations // *J. Stat. Phys.* – 1978. – **19**, N 1. – P. 25–52.
2. *Feigenbaum M.J.* The universal metric properties of nonlinear transformations // *Ibid.* – 1979. – **21**, N 6. – P. 669–706.
3. *Manneville P., Pomeau Y.* Different ways to turbulence in dissipative dynamical systems // *Physica D: Nonlinear Phenomena.* – 1980. – **1**, N 2. – P. 219–226.
4. *Pomeau Y., Manneville P.* Intermittent transition to turbulence in dissipative dynamical systems // *Comm. Math. Phys.* – 1980. – **74**, N 2. – P. 189–197.
5. *Кузнецов С. П.* Динамический хаос. – М.: Физматлит, 2006. – 356 с.
6. *Анищенко В.С., Астахов В.В., Вадивасова Т.Е. и др.* Нелинейные эффекты в хаотических и стохастических системах. – Москва–Ижевск: ИКИ, 2003. – 530 с.

7. *Kononenko V.O.* Vibrating system with a limited power-supply. – London, Piffie, 1969. – 236 p.
8. *Краснопольская Т.С., Швець А.Ю.* Детерминированный хаос в системе генератор–пьезокерамический излучатель // Нелинейная динамика. – 2006. – 2, № 1. – С. 55–74.
9. *Швець О.Ю., Краснопольська Т.С.* Динамічний хаос в п'єзокерамічних системах обмеженої потужності. Ч. 1 // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2006. – № 2. – С. 150–158.
10. *Krasnopolskaya T.S., Shvets A.Yu.* Deterministic chaos in a system generator–piezoceramic transducer // Nonlinear Dynamics and Systems Theory. – 2006. – 6, N 4. – P. 367–387.
11. *Краснопольская Т. С., Швець А.Ю.* Регулярная и хаотическая динамика систем с ограниченным возбуждением. – М.; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2008. – 280 с.
12. *Хайпер Е., Нерсентм С.П., Ваннер Г.* Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи. – М.: Мир, 1990. – 512 с.
13. *Benettin G., Galgani L., Giorgilli A., Strelcyn J.M.* Lyapunov Characteristic Exponents for Smooth Dynamical Systems and for Hamiltonian Systems; a Method for Computing All of them. P.1 // Meccanica. – 1980. – 15, N 1. – P. 9–20.
14. *Benettin G., Galgani L., Giorgilli A., Strelcyn J.M.* Lyapunov Characteristic Exponents for Smooth Dynamical Systems and for Hamiltonian Systems; a Method for Computing All of them. P.2 // Ibid. – P. 21–30.
15. *Filon L.N.G.* On a quadrature formula for trigonometric integrals // Proc. R. Soc. Edinburgh. – 1929. – 49. – P. 38–47.
16. *Henon M.* On the numerical computation of Poincare maps // Physica D. – 1982. – 5, N 2. – P. 412–415.

Рекомендована Радою
фізико-математичного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
19 травня 2008 року

ПАМ'ЯТІ КОЛЕГИ



22 жовтня 2008 р. на 65-му році раптово пішов із життя доктор економічних наук, професор Ігор Валентинович Недін.

І.В. Недін народився 21 жовтня 1944 р. в сім'ї службовців у м. Кривому Розі. Все його життя було пов'язане з Київським політехнічним інститутом. З 1961 по 1966 р. він навчався на електроенергетичному факультеті інституту. У жовтні 1969 р. вступив до аспірантури на кафедрі "Електричні мережі та системи", яку закінчив у 1972 р., після чого працював старшим науковим співробітником кафедри електропостачання. У 1974 р. захистив кандидатську дисертацію на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук. З вересня 1978 р. був асистентом кафедри економіки та організації виробництва. У 1995 р. захистив докторську дисертацію і працював на кафедрі економіки та організації промислових технологій і енергетики. З 2001 р. — професор кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів та систем. Під керівництвом І.В. Недіна створено наукову школу з проблем аналізу умов забезпечення сталого розвитку й економічної безпеки територіально-виробничих систем.

Як визнаний фахівець-економіст професор І.В. Недін працював у п'яти спеціалізованих радах із захисту дисертацій. Був членом Спеціалізованої ради при Інституті економіки та прогнозування НАН України. Брав активну участь в експертних комісіях та робочих групах щодо організації і проведення наукових та науково-методичних конференцій, симпозіумів, семінарів. Був членом експертної комісії з проведення щорічного конкурсу на кращі підручники, навчальні посібники, монографії, членом оргбюро Міжнародного постійно діючого наукового семінару "Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики" при інституті систем енергетики ім. О.О.Мелентьева Сибірського відділення РАН (м. Іркутськ). Активно працював у редакційних колегіях наукових і науково-методичних видань, таких, як "Наукові вісті НТУУ "КПІ", "Енергетика: економіка, технології, екологія" (НТУУ "КПІ"), "Стратегія економічного розвитку України" (видання НАН України), "Економіка регіона" (Єкатеринбурзький Інститут економіки Уральського відділення РАН), "Львівська політехніка", "Вісник Сумського державного університету".

Ігор Валентинович підготував одного доктора і десять кандидатів економічних наук, в тому числі й для зарубіжних країн (зокрема, один із цих учених сьогодні обіймає посаду заступника Міністра енергетики Нігерії).

І.В. Недін — автор більше двохсотп'ятидесяти опублікованих наукових праць.

За успіхи в науковій та педагогічній діяльності він був удостоєний звань "Викладач-дослідник", "Почесний енергетик України", а також нагороджений урядовим нагрудним знаком "Петро Могила", медалями ВДНГ СРСР і УРСР.

Редакція журналу "Наукові вісті НТУУ "КПІ" разом з колективом університету і теплоенергетичного факультету глибоко сумує і широко співчуває рідним, близьким і друзям Ігоря Валентиновича Недіна з приводу його смерті.

РЕФЕРАТИ

УДК 339.564.4

Оцінка експортного потенціалу електроенергетики України в контексті концепції сталого розвитку / Серебренніков Б.С. // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2008. – № 5. – С. 5–11.

Розглядаються проблеми оцінки експортного потенціалу електроенергетики. Запропоновано оцінні показники, коефіцієнти покриття і реалізації, критерії оптимальності. Здійснено систематизацію факторів та загальну характеристику їх впливу на експортний потенціал. Визначено економічну модель експортного потенціалу та проаналізовано її чутливість до змін елементів.

Лл. 2. Табл. 2. Бібліогр.: 12 назв.

УДК 621.372.061

Підвищення точності ортогональних перетворень для аналізу лінійних систем / Ніжебецька Ю.Х., Рибін О.І., Шарпан О.Б. // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2008. – № 5. – С. 12–18.

Проводиться аналіз застосування немінімальних формул обчислення похідної при використанні методу ортогональних перетворень, що приводить до підвищення точності вибраного методу порівняно з випадком застосування формули розділеної різниці.

Лл. 8. Бібліогр.: 5 назв.

УДК 536.24

Дослідження структури потоку в міжреберних каналах поверхонь з пластинчасто-розрізним оребренням методами числового моделювання / Баранюк О.В., Письменний Є.М., Семеняко О.В. // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2008. – № 5. – С. 19–26.

Наведено результати числових розрахунків структури потоку в напіввідкритих каналах, утворених розрізними ребрами. Числові дані з достатньою достовірністю підтверджуються експериментально. Показано, що розрізка ребра приводить до виникнення аеродинамічних ефектів різноманітної природи, що сприяють інтенсифікації теплообміну.

Лл. 13. Бібліогр.: 13 назв.

УДК 536.423.4

Визначення локальної по довжині тепловіддачі при конденсації пари R407C в горизонтальній трубі / Безродний М.К., Голяд М.Н., Барабаш П.О., Дейнеко А.І. // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2008. – № 5. – С. 27–32.

Розглянуто вплив масовіддачі на локальну тепловіддачу по довжині гладкої горизонтальної труби при конденсації в ній суміші R407C. З певними припущеннями проведено розрахунок масовіддачі компонента R134A при конденсації пари R407C. Зниження інтенсивності тепловіддачі при конденсації хладону R407C на початковій ділянці порівняно з аналогічними умовами для R22 пояснюється наявністю дифузійного пограничного шару біля поверхні плівки конденсату. Наведено методику розрахунку коефіцієнта тепловіддачі при конденсації R407C.

Бібліогр.: 10 назв.

УДК 621.311

Аналіз самозапуску асинхронного двигуна при несиметрії напруги в енергосистемі / За І., Курач Т.Ю. // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2008. – № 5. – С. 33–38.

Розроблено математичну модель і алгоритм визначення умов самозапуску при несиметрії напруги в енергосистемі. Виконано дослідно-промислові розрахунки самозапуску двигуна, складено програму в середовищі MatLab для розрахунку самозапуску асинхронного двигуна.

Лл. 9. Бібліогр.: 4 назви.

УДК 519.85

Операції та відношення над нечіткими числами / Ємець О.О., Ємець Ол-ра О. // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2008. – № 5. – С. 39–46.

Введено поняття характеристичної функції нечіткого числа, операції додавання нечітких чисел, а також відношення впорядкованості нечітких чисел. Досліджено властивості запропонованих операцій і відношень. Ці поняття, операції і відношення можуть бути використані при моделюванні задач оптимізації з нечіткими даними.

Бібліогр.: 19 назв.

УДК 004.75

Дослідження засобів і розробка компонентної моделі інформаційно-комунікаційної системи аналізу даних / Масляк П.П., Вознюк А.С., Вознюк С.С. // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2008. – № 5. – С. 47–56.

Досліджено існуючі методи і засоби обробки і аналізу даних. Проведено формалізацію процесів обробки та аналізу даних. Розроблено компонентну модель інформаційно-комунікаційної системи обробки і аналізу даних на основі об'єктно-орієнтованого підходу.

Лл. 1. Табл. 1. Бібліогр.: 33 назви.

УДК 004.896

Комплекс моделей для побудови Web-системи безперервного навчання / Титенко С.В. // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2008. – № 5. – С. 57–66.

Подано комплекс моделей, які є підґрунтям для програмної реалізації автоматизованої системи безперервного навчання. За допомогою розглянутих моделей розв'язуються такі задачі, як створення єдиного багатопредметного сховища навчальних матеріалів, багаторівнева формалізація навчального контенту, автоматизація тестування і діагностики знань, генерація індивідуального навчального курсу і адаптація навчального процесу до потреб студента.

Лл. 2. Бібліогр.: 25 назв.

УДК 621.762.5:548.5

Вплив ультразвукової та термічної обробки на структурну досконалість монокристалів LaB₆ / Кисла Г.П., Богомол Ю.І., Карасєвська О.П., Криклива І.Ю. // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2008. – № 5. – С. 67–72.

Наведено результати дослідження впливу ультразвукової та термічної обробки на структурну досконалість монокристалів гексабориду лантану, отриманого методом безтигельної зонної плавки. Показано, що в монокристалах в результаті випаровування домішок утворюються пори, кількість яких зменшується під впливом УЗК. Ступінь дефектності структури кристалів зменшується в процесі нагріву при передплавильних температурах.

Лл. 6. Бібліогр.: 5 назв.

УДК 539.216.2:661.685

Дослідження механічних напружень у тонкоплівкових композиціях плівка Ta(100–540 нм)/монокристал Si(001) / Павлова О.П. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2008. – № 5. – С. 73–77.

Вивчено вплив основних параметрів отримання тонкоплівкових композицій Ta(100–540 нм)/Si(001) – температури підкладки під час осадження плівки Ta, товщини осадженої плівки Ta, а також параметрів їх подальшої термообробки в інтервалі температур 570–1070 К на величину і знак механічних напружень. Дано опис можливих механізмів виникнення напружень у досліджених плівкових композиціях.

Лл. 6. Бібліогр.: 16 назви.

УДК 621.762.3

Дослідження впливу ультразвукової обробки на процес диспергування оксиду алюмінію і його властивості, одержаного кріохімічним способом / Руденький С.О. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2008. – № 5. – С. 78–82.

Вивчався вплив ультразвукової обробки (УЗО) на характер і ступінь подрібнення традиційного оксиду алюмінію і агломератних утворень у порошку оксиду алюмінію, отриманого за кріохімічною технологією. Вивчено деякі властивості таких порошоків.

Лл. 6. Табл. 1. Бібліогр.: 4 назви.

УДК 621.791.753

Визначення параметрів імпульсних електромагнітних дій для керування процесом переносу електродного металу / Сидоренко П.Ю., Рижов Р.М., Золотовський А.О., Болотов Г.П. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2008. – № 5. – С. 83–87.

Розроблено математичну модель для визначення оптимальних параметрів керуючих магнітних полів для умов зварювання плавким електродом із врахуванням теплофізичних властивостей матеріалу краплі в розплавленому стані і електричних параметрів режиму зварювання. Визначено оптимальні градієнти і амплітуди індукції для ефективного керування процесом переносу електродного металу. Досліджено зміни параметрів масопереносу при зварюванні з імпульсними електромагнітними діями.

Лл. 4. Бібліогр.: 7 назв.

УДК 676.18

Оптимізація органосольвентних способів одержання солом'яної целюлози / Барбаш В.А., Трембус І.В., Складанний Д.М. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2008. – №5. – С. 88–92.

У результаті математичної обробки одержаних експериментальних даних за допомогою повного факторного експерименту типу 2² були розраховані адекватні статистичні моделі процесу делігніфікації пшеничної соломи лужно-сульфитно-спиртовим, аміачно-сульфитно-спиртовим та двостадійним лужно-спиртовим способами варіння з додаванням антрахінону. Проведено пошук оптимальних значень технологічних параметрів процесів із використанням критерію оптимізації Харрінгтона. Встановлено, що найбільш придатним для отримання солом'яної целюлози є лужно-сульфитно-спиртовий спосіб делігніфікації соломи пшениці.

Лл. 1. Табл. 4. Бібліогр.: 9 назв.

УДК 621.357.7

Вплив імпульсного струму на електроосадження нікелю із сульфаматних електролітів / Донченко М.І., Редько Р.М., Нагорний О.В., Мотронюк Т.І. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2008. – № 5. – С. 93–98.

Досліджено вплив параметрів імпульсного струму на морфологію покриттів і електрохімічні характеристики процесу електроосадження нікелю із сульфаматних електролітів. Визначено режими електролізу, які сприяють блискоутворенню, зменшенню пористості покриттів і підвищенню виходу за струмом металу. Показано, що вихід за струмом зростає при зниженні шпаруватості і збільшенні частоти імпульсного струму. Використання імпульсів з великою шпаруватістю призводить до утворення дрібнодисперсних блискучих гладких осадів з величиною зерна 20–30 нм.

Лл. 4. Табл. 1. Бібліогр.: 10 назв.

УДК 677:658:567

Використання водорозчинних хімічних відходів у технології майоліки / Палейчук В.С., Бондаренко С.О. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2008. – № 5. – С. 99–104.

Методом ротаційної вискозиметрії вивчено вплив відходів хімічного фрезерування алюмінію (ВХФА) на реологічну поведінку керамічних шлікерів у динамічних умовах, що моделюють процеси шлікерного лиття в технології кераміки декоративного призначення.

Встановлено, що хімічна обробка ВХФА керамічних шлікерів виявляє антикоагуляційну дію, яка знаходить відображення у зменшенні реологічних параметрів керамічних шлікерів та супроводжується розріджувальним ефектом. На основі проведених експериментальних досліджень дано фізико-хімічне обґрунтування діапазону рекомендованих концентрацій ВХФА (0,5–0,75 %), що забезпечує поліпшення технологічних параметрів керамічних шлікерів. Вивчено кінетику зміцнення (загустіння) керамічних шлікерів при наявності ВХФА (0,5 %) в статичних умовах. Встановлено, що хімічна обробка ВХФА, підвищуючи агрегативну і кінетичну стійкість керамічних шлікерів, попереджає їх розшарування в об'ємі, сприяє стабільності реологічних параметрів у процесі шлікерного лиття.

Лл. 6. Табл. 5. Бібліогр.: 11 назв.

УДК 666.9 (075.8)

Гідратаційна активність сумісно розмелених вапняно-вапнякових сумішей / Паславська А.П., Сербін В.П., Булана О.В. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2008. – № 5. – С. 105–108.

Встановлено основні фактори, які впливають на сумісну розмелюваність вологого вапняку і вапна, досліджено гідратаційну активність і склад вапняно-вапнякових сумішей.

Лл. 2. Табл. 1. Бібліогр.: 5 назв.

УДК 544.2:519.8

Дослідження і моделювання процесів адсорбції/десорбції оксидів азоту на цеолітах / Примиська С.О., Безносик Ю.О., Статюха Г.О., Решетіловський В.П. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2008. – № 5. – С. 109–113.

Наведено результати експериментальних досліджень процесу адсорбції/десорбції оксидів азоту з газового потоку на синтетичних цеолітах Х-типу. Отримано, що поглинальна здатність досліджуваних цеолітів становить 100 %, що свідчить про повне видалення оксидів азоту з газового потоку. Наведено математичну модель досліджуваного процесу, ви-

значено оптимальні умови та параметри процесу та доведено її адекватність. Отримані результати показують про доцільність застосування методу та його математичного опису на практиці.

Лл. 7. Бібліогр.: 11 назв.

УДК 541.8

Зв'язок між параметрами рівняння кінетичного компенсаційного ефекту в термодинаміці активації в'язкої течії рідин та структурою розчинів / Рудницька Г.А., Каменська Т.А., Ренський І.О. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2008. – № 5. – С. 114–117.

Проаналізовано зв'язок між коефіцієнтами A і B рівняння $\Delta H_{\eta}^{\ddagger} = \Delta G_{\eta}^{\ddagger} + T\Delta S_{\eta}^{\ddagger}$, яке описує компенсаційний ефект у термодинаміці активації в'язкої течії рідин Ейрінга, та деякими структурозалежними властивостями розчинів, що містять іони, а саме граничною молярною електропровідністю, граничним коефіцієнтом дифузії, коефіцієнтом B рівняння в'язкості розчинів електролітів Джонса–Дола. Показано, що в ряді водних розчинів галогенідів лужних металів в міру ослаблення їх структури параметр A закономірно зменшується, а стала B , навпаки, зростає, на основі чого можна стверджувати, що коефіцієнти A і B рівняння компенсаційного ефекту можуть слугувати критеріями при оцінюванні ступеня структурованості водних розчинів електролітів.

Табл. 3. Бібліогр.: 6 назв.

УДК 667:64, 667:6

Вплив термодинамічної сумісності розчинника та плівкоутворюючого полімера на захисні властивості лакофарбового покриття / Свідерський В.А., Миронюк О.В. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2008. – № 5. – С. 118–121.

Встановлено густину енергії когезії плівкоутворюючого полімеру, визначено її складові за допомогою віскозиметричного методу та методу осадження. Знайдено межі розчинності полімеру, побудовано діаграму розчинності. Одержано лакові плівки з використанням розчинників різного ступеня термодинамічної сумісності з полімером. Виконано аналіз бар'єрних властивостей цих матеріалів за допомогою ємнісно-омічного методу. На основі цих даних зроблено висновок про критерій вибору розчинника для оптимізації бар'єрних властивостей лакових матеріалів.

Лл. 2. Табл. 3. Бібліогр.: 8 назв.

УДК 519.1

Застосування параперманентів до лінійних рекурентних рівнянь / Заторський Р.А., Литвиненко І.М. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2008. – № 5. – С. 122–128.

Розглядаються застосування параперманентів трикутних матриць до дослідження властивостей числових послідовностей, породжених лінійними рекурентними рівняннями

k -го порядку із сталими коефіцієнтами. Зокрема, доведено деякі загальні твердження про властивості теоретико-числових послідовностей, породжених лінійними рекурентними рівняннями другого порядку.

Бібліогр.: 8 назв.

УДК 517.9

Властивості розв'язків класу параметризованих операторних включень / Капустян В.О., Касьянов П.О., Когут О.П. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2008. – № 5. – С. 129–136.

Досліджуються властивості розв'язків параметризованих операторних включень з багатозначними відображеннями типу \bar{S}_k . Доведено теорему про розв'язність таких включень, слабку компактність та залежність від параметрів множин їх розв'язків. Наведено приклад, який ілюструє одержані результати.

Бібліогр.: 15 назв.

УДК 571.986

Розв'язність одного класичного лінійного еліптичного диференціального рівняння другого порядку / Кухарчук М.М., Яременко М.І. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2008. – № 5. – С. 137–141.

Досліджено лінійне еліптичне рівняння другого порядку у всьому евклідовому просторі R^l , $l \geq 3$. Одержано результати щодо існування і єдиності розв'язків таких рівнянь.

Бібліогр.: 3 назви.

УДК 517.938: 534.23

Різноманітність сценаріїв переходу до хаосу в детермінованій системі генератор–п'єзокерамічний випромінювач / Швець О.Ю., Печерний В.А. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2008. – № 5. – С. 142–149.

Розглянуто сценарії переходів до хаосу в детермінованій динамічній системі генератор–п'єзокерамічний випромінювач. Показано, що системі притаманні всі основні сценарії переходів до хаосу. Побудовано і детально проаналізовано карту динамічних режимів системи. Ретельно вивчено основні типи регулярних і хаотичних атракторів. Виявлено існування переходів до хаосу, пов'язане з руйнуванням квазіперіодичних атракторів.

Лл. 4. Бібліогр.: 16 назв.

АВТОРИ НОМЕРА

Барабаш Петро Олексійович,

кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Баранюк Олександр Володимирович,

інженер Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Барбаш Валерій Анатолійович,

кандидат хімічних наук, заступник проректора з наукової роботи Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Безносик Юрій Олександрович,

кандидат технічних наук, доцент, доцент Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Безродний Михайло Костянтинович,

доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Богомол Юрій Іванович,

кандидат технічних наук, асистент кафедри Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Болотов Геннадій Павлович,

доктор технічних наук, професор Чернігівського державного технологічного університету.

Бондаренко Сергій Олексійович,

старший викладач Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Булана Оксана Василівна,

здобувач Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Вознюк Андрій Святославович,

магістрант Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Вознюк Сергій Святославович,

магістрант Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Голяд Микола Никифорович,

науковий співробітник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Дейнеко Андрій Іванович,

аспірант Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Донченко Маргарита Іванівна,

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Ємець Олег Олексійович,

доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри Полтавського університету споживчої кооперації України.

Ємець Олександра Олегівна,

аспірантка Полтавського університету споживчої кооперації України.

Заторський Роман Андрійович,

кандидат фізико-математичних наук, доцент Прикарпатського національного університету ім. Василя Стефаника.

Золотовський Аркадій Олексійович,

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник Інституту фізики напівпровідників НАН України.

Зіа Іман,

магістрант Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Каменська Тетяна Анатоліївна,

кандидат хімічних наук, доцент Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Капустян Володимир Омелянович,

доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Карасевська Ольга Павлівна,

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України.

Касьянов Павло Олегович,

кандидат фізико-математичних наук, докторант Навчально-наукового комплексу “Інститут прикладного системного аналізу” Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Кисла Галина Павлівна,

молодший науковий співробітник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Когут Ольга Петрівна,

аспірантка Навчально-наукового комплексу “Інститут прикладного системного аналізу” Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Криклива Ірина Юріївна,

студентка 6-го курсу Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Курач Тетяна Юріївна,

асистент кафедри Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Кухарчук Микола Макарович,

доктор фізико-математичних наук, професор, професор Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Литвиненко Ірина Миколаївна,

кандидат фізико-математичних наук, асистент кафедри Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Маслянюк Павло Павлович,

кандидат технічних наук, доцент, заступник декана факультету прикладної математики з наукової роботи Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Миронюк Олексій Володимирович,

аспірант Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Мотронюк Тетяна Іванівна,

кандидат технічних наук, доцент, доцент Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Нагорний Олексій Вікторович,

студент Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Ніжебецька Юлія Хамідуллаївна,

студентка Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Павлова Олена Петрівна,

доктор технічних наук, старший науковий співробітник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Палейчук Валентина Сергіївна,

кандидат хімічних наук, доцент, доцент Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Паславська Алла Петрівна,

кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Печерний Володимир Анатолійович,

аспірант Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Письменний Євген Миколайович,

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Примиська Світлана Олексіївна,

аспірантка Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Редько Раїса Макарівна,

науковий співробітник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Ренський Ігор Олександрович,

старший викладач Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Решетіловський Володимир Петрович,

доктор технічних наук, професор Інституту технічної хімії Технічного університету (м. Дрезден).

Рибін Олександр Іванович,

доктор технічних наук, професор, декан радіотехнічного факультету Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Рижов Роман Миколайович,

доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Руденький Сергій Олексійович,

асистент кафедри Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Рудницька Ганна Анатоліївна,

кандидат хімічних наук, доцент, доцент Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Свідерський Валентин Анатолійович,

доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Семеняко Олександр Володимирович,

асистент Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Сербін Володимир Петрович,

доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Серебренников Богдан Сергійович,

кандидат економічних наук, доцент Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Сидоренко Павло Юрійович,

аспірант Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Складаний Денис Миколайович,

кандидат хімічних наук, доцент Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Статюха Геннадій Олексійович,

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Титенко Сергій Володимирович,

аспірант, асистент кафедри Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Трембус Ірина Віталіївна,

молодший науковий співробітник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Шарпан Олег Борисович,

доктор технічних наук, доцент, доцент Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Швець Олександр Юрійович,

доктор фізико-математичних наук, професор Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Яременко Микола Іванович,

студент Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

НАУКОВІ ВІСТІ

Національного технічного університету України
"Київський політехнічний інститут"

Науково–технічний журнал

№ 5(61)

2008

Започаткований у вересні 1997 року

Редакційна колегія:

Головний редактор
М.З. Згуровський

Заступник головного
редактора
М.Ю. Льченко

Відповідальний секретар
П.П. Маслянко

Члени редколегії –
координатори
наукових напрямків

М.І. Бобир

С.Г. Бунін

В.Ю. Горчаков

І.А. Дичка

О.В. Збруцький

І.В. Недін

Б.В. Новіков

О.М. Новіков

А.В. Праховник

Є.М. Письменний

Д.Ф. Чернега

О.Г. Юрченко

Ю.І. Якименко

Редакційна рада

Адреса редакції:
03056, Київ-56,
проспект Перемоги, 37,
Національний технічний
університет України
"Київський політехнічний
інститут",
Тел. 454-91-23

У номері:

Економіка та організація
виробництва

Електроніка, радіотехніка та
засоби телекомунікацій

Енергетика та нові
енергогенеруючі технології

Інформаційні технології,
системний аналіз та керування

Матеріалознавство
та машинобудування

Проблеми хімії та хімічної
технології

Теоретичні та прикладні
проблеми фізико-математичних
наук

Засновник – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”
Свідоцтво про державну реєстрацію журналу – серія КВ № 2863, видане 26 вересня 1997 року

Рекомендовано Вченою Радою Національного технічного університету України
“Київський політехнічний інститут”, протокол № 11 від 03.11.08 р.

Члени редакційної ради (за галузями науки)

Фізико-математичні науки

<i>Математика</i>	<i>Фізика</i>	<i>Механіка</i>	<i>Інформатика і кібернетика</i>
В.В. Булдігін	В.Г. Бар’яхтар	А.Е. Бабаєв	Ю.М. Данілін
Н.О. Вірченко	Ю.І. Горобець	С.О. Довгий	О.С. Макаренко
А.А. Дороговцев	В.М. Локтев	Я.Ф. Каюк	В.В. Остапенко
М.М. Кухарчук	С.І. Сидоренко	В.В. Матвеев	Н.Д. Панкратова
А.М. Самойленко	А.П. Шпак	Ю.М. Шевченко	В.М. Панін

<i>Хімічні науки</i>	<i>Біологічні науки</i>	<i>Технічні науки</i>	<i>Економічні науки</i>	
О.О. Андрійко	Л.Б. Бондаренко	В.І. Губар	О.А. Павлов	О.Ф. Балацький
І.М. Астрелін	П.І. Гвоздяк	В.С. Коваленко	М.Г. Попович	В.Г. Герасимчук
А.К. Дорош	О.М. Дуган	В.І. Костюк	В.М. Прохоренко	Є.В. Крикавський
Ю.А. Малетін	Л.А. Лившиць	Ю.Ю. Лукач	Н.С. Равська	М.П. Панченко
А.А. Фокін	С.С. Малюта	Г.М. Любчик	В.О. Румбешта	Г.К. Яловий
	В.С. Підгорський	Є.А. Мачуський	В.І. Сенько	
	Ю.М. Сиволап		В.П. Тарасенко	
	С.С. Ставська		Я.К. Трохименко	

Секретар редакції Л.Д. Калько

Редактор В.Г. Мельник

Графічний дизайн Б.В. Валуєнка
Комп’ютерна верстка О.М. Нестеренко

Підписано до друку 04.11.2008. Формат 60×84¹/8. Папір офс. Гарнітура Times.
Спосіб друку – ризографія. Ум. др. арк. 18,60. Обл.-вид. арк. 31,68. Зам. № Тираж 200 прим.

НТУУ “КПІ” ВПІ ВПК “Політехніка”. 03056, Київ, вул. Політехнічна, 14, корп. 15.
Тел./факс (044) 241-68-78

ЗМІСТ

Економіка та організація виробництва

Серебренніков Б.С. Оцінка експортного потенціалу електроенергетики України в контексті концепції сталого розвитку 5

Електроніка, радіотехніка та засоби телекомунікацій

Ніжебецька Ю.Х., Рибін О.І., Шарпан О.Б. Підвищення точності ортогональних перетворень для аналізу лінійних систем 12

Енергетика та нові енергогенеруючі технології

Баранюк О.В., Письменний Є.М., Семеняко О.В. Дослідження структури потоку в міжреберних каналах поверхонь з пластинчасто-розрізним орєбренням методами числового моделювання 19

Безродний М.К., Голіад М.Н., Барабаш П.О., Дейнеко А.І. Визначення локальної по довжині тепловіддачі при конденсації пари R407C в горизонтальній трубі 27

Зіа І., Курач Т.Ю. Аналіз самозапуску асинхронного двигуна при несиметрії напруги в енергосистемі 33

Інформаційні технології, системний аналіз та керування

Ємець О.О., Ємець Ол-ра О. Операції та відношення над нечіткими числами 39

Маслякко П.П., Вознюк А.С., Вознюк С.С. Дослідження засобів і розробка компонентної моделі інформаційно-комунікаційної системи аналізу даних 47

Титенко С.В. Комплекс моделей для побудови Web-системи безперервного навчання 57

Матеріалознавство та машинобудування

Кисла Г.П., Богомол Ю.І., Карасєвська О.П., Криклива І.Ю. Вплив ультразвукової і термічної обробки на структурну досконалість монокристалів LaV₆ ... 67

Павлова О.П. Дослідження механічних напружень у тонкоплівкових композиціях плівка Ta(100–540 нм)/монокристал Si(001) 73

Руденький С.О. Дослідження впливу ультразвукової обробки на процес диспергування оксиду алюмінію та його властивості, одержаного криохімічним способом 78

Сидоренко П.Ю., Рижов Р.М., Золотовський А.О., Болотов Г.П. Визначення параметрів імпульсних електромагнітних дій для керування процесом переносу електродного металу 83

Проблеми хімії та хімічної технології

Барбаш В.А., Трембус І.В., Складанний Д.М. Оптимізація органосольвентних способів одержання солом'яної целюлози 88

Донченко М.І., Редько Р.М., Нагорний О.В., Мотронюк Т.І. Вплив імпульсного струму на електроосадження нікелю із сульфатних електролітів ... 93

Палейчук В.С., Бондаренко С.О. Використання водорозчинних хімічних відходів у технології майоліки 99

Паславська А.П., Сербін В.П., Булана О.В. Гідратаційна активність сумісно розмелених вапняно-вапнякових сумішей 105

Примиська С.О., Безносик Ю.О., Статюха Г.О., Решетіловський В.П. Дослідження і моделювання процесів адсорбції/десорбції оксидів азоту на цеолітах 109

Рудницька Г.А., Каменська Т.А., Ренський І.О. Зв'язок між параметрами рівняння кінетичного компенсаційного ефекту в термодинаміці активації в'язкої течії рідин та структурою розчинів 114

Свідерський В.А., Миронюк О.В. Вплив термодинамічної сумісності розчинника та плівкоутворюючого полімера на захисні властивості лакофарбового покриття 118

Теоретичні та прикладні проблеми фізикоматематичних наук

Заторський Р.А., Литвиненко І.М. Застосування папаперманентів до лінійних рекурентних рівнянь 122

Капустян В.О., Касьянов П.О., Когут О.П. Властивості розв'язків класу параметризованих операторних включень 129

Кухарчук М.М., Яременко М.І. Розв'язність одного класичного лінійного еліптичного диференціального рівняння другого порядку 137

Швець О.Ю., Печерний В.А. Різноманітність сценаріїв переходу до хаосу в детермінованій системі генератор–п'єзокерамічний випромінювач 142

Пам'яті колеги 150

Реферати 151

Автори номера 154

CONTENTS

Economy and organization of production

- Serebrennikov B.S.* The Estimation of Export Potential of Power Engineering of Ukraine in Context of Sustainable Development 5

Electronics, radio engineering and telecommunications

- Nizebetska Yu.Kh., Rybin O.I., Sharpan O.B.* The Increase of the Precision of the Orthogonal Transformations for the Analysis of the Linear Systems 12

Power engineering and new energy generation technologies

- Baranyuk O.V., Pysmennyi Ye.M., Semenyako O.V.* Research of stream structure in the intercostals ducting from the surfaces with plate-cutted finning of numeral design methods 19

- Bezrodny M.K., Goliyad M.N., Barabash P.O., Deyneko A.I.* The Determination of the Local on the Heat Transfer Length at Condensation Vapor R407C in a Horizontal Pipe 27

- Zia I., Kurach T.Yu.* The Analysis of Asynchronous Engine Self-Start at Asymmetry in the System 33

Information technology, system analysis and guidance

- Yemets' Oleg O., Yemets' Oleksandra O.* Operations and Relations on Fuzzy Numbers 39

- Maslyanko P.P., Voznyuk A.S., Voznyuk S.S.* The Research of Means and Development of Component Model of Information-Communication System of Data Analysis 47

- Tytenko S.V.* The Set of Models for Building the On-going Learning Web-system 57

Materials science and machine building

- Kysla G.P., Bogomol I.I., Karasevskaya O.P., Kryklyva I.Yu.* The Influence of Ultrasonic and Heat Treatment on Structural Perfection of LaB₆ Monocrystals ... 67

- Pavlova O.P.* The Investigation of Mechanical Stresses in Ta(100–540 nm) Film/Si(001)Single Crystal thin film compositions 73

- Rudenskiy S.O.* The Study of Ultrasonic Treatment Influence on Dispersion and Properties of Aluminium Oxide by Cryochemical Method 78

- Sidorenko P.Yu., Ryzhov R.M., Zolotovskiy A.O., Bolotov G.P.* Parameters Determination of Impulsive Electromagnetic Actions for the Process Control of Electrode Metal Transfer 83

Problems of chemistry and chemical engineering

- Barbash V.A., Trembus I.V., Skladanny D.M.* Optimization of organosolvent methods for obtaining straw pulp 88

- Donchenko M.I., Redko R.M., Nagornyj O.V., Motronyuk T.I.* The Influence of a Pulse Current on Nickel Electrodeposition from Sulfamate Electrolytes 93

- Paleychuk V.S., Bondarenko S.O.* The Usage of Soluble Chemical Siftings in the Technology of Majolica . 99

- Paslavskaya A.P., Serbin V.P., Bulana O.V.* The Grindability and Hydration Activity of Lime-Limestone Mixtures 105

- Prymyska S.O., Beznosyk Yu.O., Statyukha G.O., Reshetilowski V.P.* Researching and Designing of Processes Adsorption/Desorption of Nitrogen Oxides on the Zeolites 109

- Rudnitskaya A.A., Kamens'ka T.A., Renskii I.O.* Relation between the Parameters of the Compensation Effect Equation in the Activation Thermodynamics of Liquids Viscous Flow and Solution Structure 114

- Svidersky V.A., Myronyuk O.V.* The Influence of Thermodynamical Compatibility of a Solvent and Film Forming Polymer on Protective Ability of Lacquer Coating 118

Theoretical and applied problems of physics and mathematics

- Zatorsky R.A., Lytvynenko I.M.* Applications of Permanents of Linear Recurrent Sequences 122

- Kapustyan V.O., Kasyanov P.O., Kogut O.P.* Solutions Properties for One Class of Parameterized Operator Inclusions 129

- Kukharchuk M.M., Yaremenko M.I.* On Solvability of One Classical Linear Elliptical Differential Second-Order Equation 137

- Shvets O.Yu., Pechernyi V.A.* Variety of Scenarios of Transition to Chaos in Deterministic System Generator–Piezoceramic Transducer 142

- Obituary 150

- Reports 151

- Contributors to the issue 154