

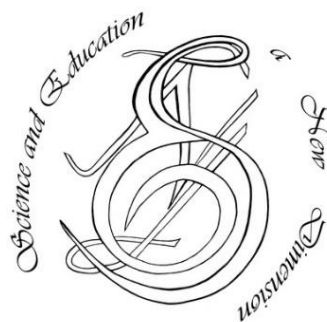
p-ISSN 2308-5258

e-ISSN 2308-1996

**Natural and Technical Sciences, III(6), ISSUE 54, 2015**

**SCIENCE AND EDUCATION A NEW DIMENSION**

**NATURAL  
AND  
TECHNICAL SCIENCES**



[www.seanewdim.com](http://www.seanewdim.com)

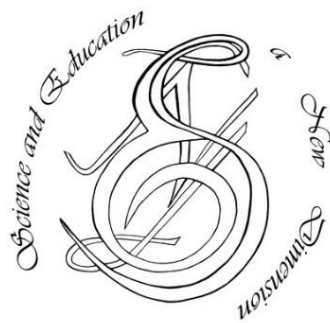
**p-ISSN 2308-5258**

**e-ISSN 2308-1996**

III(6), Issue 54, 2015

**SCIENCE AND EDUCATION A NEW DIMENSION**

**Natural and Technical Sciences**



Editorial board

**Editor-in-chief: Dr. Xénia Vámos**

**Honorary Senior Editor:**

**Jenő Barkáts, Dr. habil. Nina Tarasenkova, Dr. habil.**

**Andriy Myachykov**, PhD in Psychology, Senior Lecturer, Department of Psychology, Faculty of Health and Life Sciences, Northumbria University, Northumberland Building, Newcastle upon Tyne, United Kingdom

**Edvard Ayvazyan**, Doctor of Science in Pedagogy, National Institute of Education, Yerevan, Armenia

**Ferenc Ihász**, PhD in Sport Science, Apáczai Csere János Faculty of the University of West Hungary

**Ireneusz Pyrzyk**, Doctor of Science in Pedagogy, Dean of Faculty of Pedagogical Sciences, University of Humanities and Economics in Wrocław, Poland

**Irina Malova**, Doctor of Science in Pedagogy, Head of Department of methodology of teaching mathematics and information technology, Bryansk State University named after Academician IG Petrovskii, Russia

**Irina S. Shevchenko**, Doctor of Science in Philology, Department of ESP and Translation, V.N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine

**Kosta Garow**, PhD in Pedagogy, associated professor, Plovdiv University „Paisii Hilendarski“, Bulgaria

**László Kótiš**, PhD in Physics, Research Centre for Natural Sciences, Hungary, Budapest

**Marian Wloshinski**, Doctor of Science in Pedagogy, Faculty of Pedagogical Sciences, University of Humanities and Economics in Wrocław, Poland

**Melinda Nagy**, PhD in Biology, associated professor, Vice-Rector, J. Selye University in Komarno, Slovakia

**Alexander Perekhrest**, Doctor of Science in History, Prof. habil., Bohdan Khmelnytsky National University in Cherkasy, Ukraine

**Nikolai N. Boldyrev**, Doctor of Science in Philology, Professor and Vice-Rector in Science, G.R. Derzhavin State University in Tambov, Russia

**Olga Sannikova**, Doctor of Science in Psychology, professor, Head of the department of general and differential psychology, South Ukrainian National Pedagogical University named after K.D. Ushynsky, Odesa, Ukraine

**Oleg Melnikov**, Doctor of Science in Pedagogy, Belarusian State University, Belarus

**Riskeldy Turgunbayev**, CSc in Physics and Mathematics, associated professor, head of the Department of Mathematical Analysis, Dean of the Faculty of Physics and Mathematics of the Tashkent State Pedagogical University, Uzbekistan

**Roza Uteeva**, Doctor of Science in Pedagogy, Head of the Department of Algebra and Geometry, Togliatti State University, Russia

**Seda K. Gasparyan**, Doctor of Science in Philology, Department of English Philology, Professor and Chair, Yerevan State University, Armenia

**Svitlana A. Zhabotynska**, Doctor of Science in Philology, Department of English Philology of Bohdan Khmelnytsky National University in Cherkasy, Ukraine

**Tatyana Prokhorova**, Doctor of Science in Pedagogy, Professor of Psychology, Department chair of pedagogics and subject technologies, Astrakhan state university, Russia

**Valentina Orlova**, CSc in Economics, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine

**Vasil Milloushev**, Doctor of Science in Pedagogy, professor of Department of Mathematics and Informatics, Plovdiv University „Paisii Hilendarski“, Plovdiv, Bulgaria

**Veselin Kostov Vasilev**, Doctor of Psychology, Professor and Head of the department of Psychology Plovdiv University „Paisii Hilendarski“, Bulgaria

**Vladimir I. Karasik**, Doctor of Science in Philology, Department of English Philology, Professor and Chair, Volgograd State Pedagogical University, Russia

**Volodimir Lizogub**, Doctor of Science in Biology, Head of the department of anatomy and physiology of humans and animals, Bohdan Khmelnytsky National University in Cherkasy, Ukraine

**Zinaida A. Kharitonchik**, Doctor of Science in Philology, Department of General Linguistics, Minsk State Linguistic University, Belarus

**Zoltán Poór**, CSc in Language Pedagogy, Head of Institute of Pedagogy, Apáczai Csere János Faculty of the University of West Hungary

Managing editor:

**Barkáts N.**

© EDITOR AND AUTHORS OF INDIVIDUAL ARTICLES

The journal is published by the support of Society for Cultural and Scientific Progress in Central and Eastern Europe  
BUDAPEST, 2015

**Statement:**

By submitting a manuscript to this journal, each author explicitly confirms that the manuscript meets the highest ethical standards for authors and coauthors. Each author acknowledges that fabrication of data is an egregious departure from the expected norms of scientific conduct, as is the selective reporting of data with the intent to mislead or deceive, as well as the theft of data or research results from others. By acknowledging these facts each author takes personal responsibility for the accuracy, credibility and authenticity of research results described in their manuscripts. All the articles are published in author's edition.

**The journal is listed and indexed in:**

INNO SPACE SCIENTIFIC JOURNAL IMPACT FACTOR: 2.642

DIRECTORY OF RESEARCH JOURNAL INDEXING

ULRICHS WEB GLOBAL SERIALS DIRECTORY

UNION OF INTERNATIONAL ASSOCIATIONS YEARBOOK

SCRIBD

ACADEMIA.EDU

GOOGLE SCHOLAR

## CONTENT

<b>ASTROPHYSICS</b> .....	6
Про природу взаємодіючої системи Бета Ліри: локалізація гарячих областей на акреційному диску як відображення замагніченості газових структур <i>М.Ю. Скульський</i> .....	6
<b>PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES</b> .....	23
Specific character of the atomic structure of the disordered condensed state <i>E.I. Borkach, G.M. Ivanitska, V.S. Kovtunenکو</i> .....	23
Вплив неоднорідностей показника заломлення на спектральні характеристики вузькосмугових оптичних фільтрів при зміні робочої довжини <i>О. Міца, В. Пецо, С. Боркач, С. Петрецький</i> .....	31
<b>TECHNICAL SCIENCES</b> .....	35
High temperature thermos-cyclical treatment as a method of influencing the structure and properties of carbonized 20Mn steel <i>О.Р. Cheiliakh, N.E. Karavaieva</i> .....	35
Application of immune focus phytosyrups in yogurt technology <i>Y. Hachak, O. Myhaylytska, V. Binkevych, J. Vavrysevych, O. Binkevych</i> .....	39
Vulnerability Analysis for Dynamic Investment Management <i>N. Lukova-Chuiko, R. Prus</i> .....	42
Features of structure changing of copper wires in terms of the complex action of current and high temperature <i>О.В. Nazarovets, V.I. Gudym, O.A. Kuzin</i> .....	47
The concept of construction an automatic system for ATC emotional condition monitoring <i>V. Temnikov, A. Peteichuk</i> .....	52
Знешкодження гіпохлоритних рідких відходів у кавітаційних полях за адіабатичних умов <i>Н.М. Гнатишин</i> .....	55
Стереолого-стереометричні принципи РЕМ-мікроскопії дисперсних ґрунтів <i>В. Мельник, О. Піскунова</i> .....	60
Дослідження процесу ультрафільтраційного очищення інвертованого бурякового екстракту <i>О.І. Сизоненко, Ю.Г. Змієвський, І.О. Крапивницька, В.Г. Мирончук</i> .....	67
Способи нормалізації інтерферограми білого світла для реконструкції профілю поверхні <i>Б.І. Стадник, А.В. Хома</i> .....	70
Система мировых порогов знаний и ее связи с атрибутами искусственных объектов <i>Е.В. Шандыба, Р.Й. Козут, А.Н. Печеник, Н.Э. Тернюк</i> .....	74

## Про природу взаємодіючої системи $\beta$ Ліри: локалізація гарячих областей на акреційному диску як відображення замагніченості газових структур

М. Ю. Скульський\*

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

\*Corresponding author. E-mail: mysuky@polynet.lviv.ua

Paper received 26.06.15; Revised 10.07.15; Accepted for publication 14.07.15.

**Анотація.** Це дослідження зніційоване публікаціями результатів узгоджених моделювань кривих блиску відомої масивної тісної подвійної системи  $\beta$  Ліри. Важливими з них є констанція значного вкладу випромінювання акреційного диску в криву блиску всієї системи. Зокрема, були виявлені дві гарячі області із температурами, що є на 10% та 20% вищими за усереднені на ободі диска (disk rim). Вони локалізовані у фазах 0.80P і 0.40P із покриванням відповідно у 30% та 10% зовнішнього краю диска. Вважається, що ці розігріті області могли бути сформовані шляхом зіткнень газових потоків з диском при переносі маси поміж компонентами. Дійсно, більш гаряча область на диску в фазах біля 0.40P природно пояснюється відхиленням коріолісовими силами основного газового потоку, що направлений від донора через точку Лагранжа в порожнину Роша акретора, з подальшим його зіткненням з диском акретора. Однак, у цей спосіб неможливо пояснити широку гарячу область диску, центровану на фазу 0.80P. Наш аналіз даних абсолютної спектрофотометрії, кривих зміни магнітного поля, променевих швидкостей та інтенсивностей спектральних ліній з фазами орбітального періоду показує, що гаряча область на акреційному диску акретора, локалізована в околі фази 0.80P, має іншу природу. Тут слід врахувати магнітне поле донора, напрям осі диполя якого поблизу цієї фази практично направлений на спостерігача і звернений до акретора. Ця гаряча область на акреційному диску утворюється в результаті зіткнення з диском замагнічених газових потоків, каналізованих магнітним полем донора, що є певним чином зорієнтованим у просторі. Енергетичний ефект від зіткнення на диску суттєво підсилений обертанням зовнішніх країв диску, зустрічним до падаючих на нього газових потоків. Структура магнітного поля донора сприяє і розігріву більш гарячої області диску в фазах поблизу 0.40P. Специфікою конфігурації магнітного поля донора пояснюється те, що на промені зору спостерігача при обертанні донора і акретора навколо спільного центру мас домінують ці гарячі області на диску акретора.

Основний висновок полягає в тому, що масоперенос, формування навколорядних газових структур, їх динаміка та енергетика регулюються магнітним полем донора. Вірогідно у взаємодії магнітних полів, згенерованих на донорі й акреторі з його диском, знаходиться й рішення проблеми реального існування та фізичної природи джет-подібних структур у системі  $\beta$  Ліри.

**Ключові слова:**  $\beta$  Ліри, магнітне поле, акреційний диск, масоперенос

### Передмова

Минає півстоліття від початку наших спектральних досліджень відомої взаємодіючої масивної подвійної системи  $\beta$  Ліри, результати яких привели до певного поступу в тлумаченні фізичної природи цієї знаменитої системи. Перш за все, це стосується ототожнення ліній огорнутого диском акретора і визначення мас обох компонентів безпосередньо зі спектру системи, виявлення і дослідження магнітного поля донора, вивчення динаміки та структури акреційного диску. Найбільш систематично спостереження проводились в 1965-1995 рр., зокрема, на 2.6-м телескопі Кримської (КРАО) та 6-м телескопі Спеціальної Астрофізичних обсерваторій (САО). Результати досліджень  $\beta$  Ліри опубліковані у десятках в основному російськомовних статей як у радянських центральних журналах, так і в публікаціях різних обсерваторій та тематичних конференцій. З часом виявилось, що багато з них не цитовані в англійських публікаціях, зокрема, у статтях-оглядах наукових досягнень методично різних спостережень  $\beta$  Ліри. Відбиваючи уподобання і напрями досліджень їх авторів, в них до цих пір не висвітлені теми, що стосуються магнітного поля  $\beta$  Ліри (наприклад, [1,2,3]). Це приводить до неповної інтерпретації результатів досліджень. У цьому ключі показовим є виявлення гарячих областей на ободі акреційного диску при моделюванні V-кривої блиску системи  $\beta$  Ліри в недавній публікації [4], що змусило нас долучитися до ґрунтовнішого трактування цього

та інших фактів з погляду досліджень магнітного поля донора та структури акреційного диску.

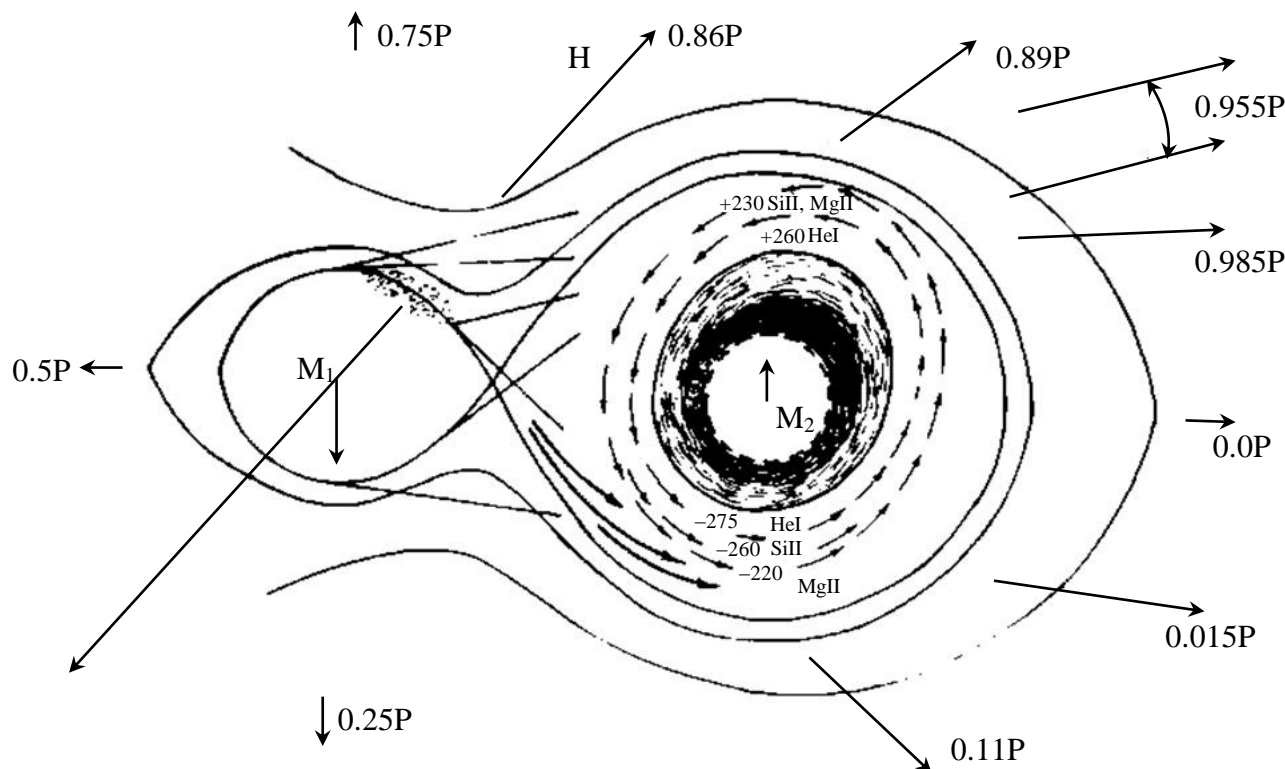
Стаття побудована наступним чином. У вступній її секції в скороченому варіанті приводяться характеристики системи  $\beta$  Ліри та основні ідеї при їх інтерпретації в тривалому процесі пізнання цієї системи з акцентами на фотометричні та спектральні дослідження, що є тут базовими. В контексті викладу як ілюстрація часто використовується схематична модель  $\beta$  Ліри, створена за нашими спектральними спостереженнями, в якій виділено дві осі, а саме, вісь вздовж центрів зір-компонетів та вісь магнітного поля донора, що є визначальними у процесах масопереносу. У двох наступних секціях коротко систематизуються та узагальнюються результати наших багаторічних досліджень магнітного поля та динамічної структури акреційного диску. В подальшому вони є необхідними як щодо інтерпретації конкретного розігріву ободу акреційного диску згідно анонсованої теми, так і стосовно викладу ширшого розуміння природи явища масопереносу, каналізованого за допомогою магнітного поля.

### Деякі аспекти вивчення взаємодіючої подвійної системи $\beta$ Ліри

Починаючи від спостережень 1780-х років [5], які започаткували відому «криву блиску типу  $\beta$  Ліри», ряд наукових публікацій про цю систему є чи не найдовшим серед зоряних об'єктів. Це пояснюється як її яскравістю, так і неординарними задачами, які вини-

кали в процесі досліджень її фізичної природи. Ефемериди системи  $\beta$  Ліри містять квадратичний член, її орбітальний період зростає на 18.9 с/рік і, за понад двісті років зростає на 0.05 дня, досягає вже майже 13 днів. Це супроводжується активним масопереносом

поміж компонентами з утворенням навколосоряних структур, зокрема, розвинутої системи газових потоків та акреційного диску, уявлення про що можна створити на основі її схематичної моделі (рис. 1.)



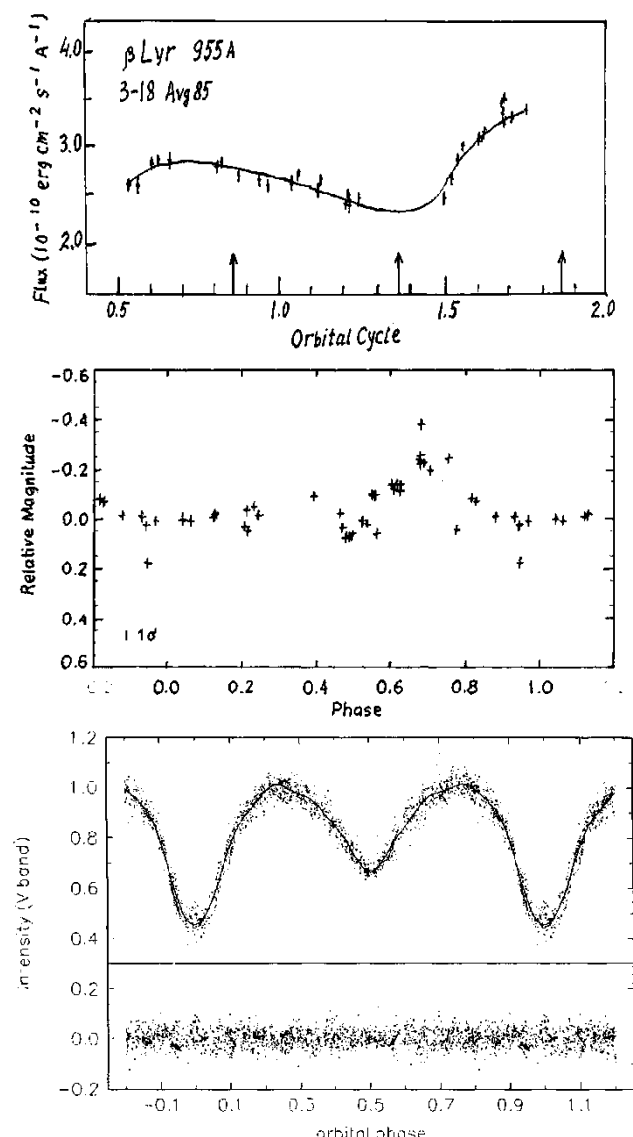
**Рис. 1.** Схематична модель взаємодіючої подвійної системи  $\beta$  Ліри за даними наших спостережень на 1990-і рр. (погляд зверху на площину орбіти) з яскравим донором типу В8III і масою  $M_1=2.9 M_{\odot}$  та з акретором масою  $M_2=13M_{\odot}$ , огорнутим густим диском із псевдоатмосферою типу А5III (зовнішній сателіт-диск означено двома рядами стрілок). Первинне або головне затемнення (донора акретором) у видимому світлі відповідає фазі 0.0P (див. рис.2). Для відношення мас  $q=0.22$  показані поверхні Роша в шкалі реального розділення між центрами компонентів  $A=58R_{\odot}$ . Втрата матерії донором (відмічено стрілками) газівий потік, відхилений силами Коріоліса до тильної сторони акретора) відбувається вздовж лінії центрів обох компонентів у напрямі орбітальних фаз 0.5-0.0P і вздовж осі магнітного поля донора у напрямі фаз 0.35-0.85P, спроектованої на площину орбіти. Показані орбітальні фази в межах  $\pm 0.1P$  до і після центру головного затемнення, в яких при проекції на донор сателіт-диску у спектрі  $\beta$  Ліри проявляються лінії-сателіти з протилежними швидкостями протилежних знаків. Для зовнішнього спостерігача, що знаходиться в площині орбіти, рух компонентів навколо їх спільного центру мас здійснюється проти годинникової стрілки.

Завдяки ідеї ущільненого масивного диску [6], що маскує від спостерігача вторинний за світністю, але масивніший компонент-акретор, криві блиску  $\beta$  Ліри у видимому діапазоні спектру (рис. 2) піддавались численним і все успішнішим моделюванням. Відповідно до недавнього моделювання кривої блиску у V-смузі [4], система  $\beta$  Ліри знаходиться у віці  $2.3 \times 10^7$  років на фінальній фазі масопереносу з темпом у  $1.58 \times 10^{-5} M_{\odot}/\text{рік}$ , що проходить у квазіконсервативним режимі. Головною проблемою [7] є узгодження результатів моделювань кривих блиску у смугах видимого спектру із такими ж у далекому ультрафіолеті [8,9] та в далекій інфрачервоній ділянці спектру [10], де спостерігається кроссовер у глибинах мінімумів.

Таке аномальне обернення глибин обох мінімумів, коли первинний або головний мінімум, створений затемненням донора акретором у видимій ділянці спектру, стає вторинним за далекими межами цієї ділянки спектру, ускладнює моделювання кривих блиску, ви-

магаючи врахування нетрадиційних джерел енергії і їх конфігурацій у системі  $\beta$  Ліри. Передовсім, це стосується великих надлишків випромінювань спектру за бальмерівською та лайманівською границями. Позаатмосферні спостереження показали [8, 9], що крива блиску за лайманівською границею деформована настільки, що втрачає ознаки подвійної системи і стає майже плоскою з одностороннім максимумом випромінювання у другій квадратурі, дещо нагадуючи по формі криві блиску магнітних зір-ротаторів (рис. 2, вгорі і в центрі). М'яке рентгенівське випромінювання (нижче 10 KeV) системи  $\beta$  Ліри, що незмінне з фазою орбітального періоду і не затемнюється компонентами, вірогідно вивіщується понад площиною орбіти [11]. Це пов'язується з томсонівським розсіянням рентгенівських променів у зоряному вітрі та газових структурах ударного характеру, що, виникаючи поблизу диску масивного акретора, огортають всю подвійну систему. Деякі аспекти розуміння цього явища даються в результатах аб-

солотної спектродотметрії  $\beta$  Ліри, проведеної впродовж орбітальної фази в межах  $\lambda\lambda 3300-7400$  [12]. Моделювання континууму на базі отриманих сканів найкраще узгоджені для зір типу В8ІІ (як донора), А5ІІІ (як диску-псевдоатмосфери, що огортає акретор) та іонізованої водневої оболонки з температурою 20000К. Вклад випромінювання останньої в континуум є більшим за такі вклади обох зір за бальмерівською границею і значно зростає в інфрачервону область спектру. Показано, що це джерело випромінювання на ефективній довжині хвилі V-смуги кривої блиску  $\beta$  Ліри у квадратурах, вторинному та головному затемненнях складає в континуумі системи відповідно 22, 13 та 8%. Це означало, що затемнення гарячого іонізованого газу здійснюється і донором, і ще більш суттєво акретором, але виникла проблема розуміння природи формування континууму в обох квадратурах.



**Рис. 2.** Криві блиску  $\beta$  Ліри: вверху і в центрі – у далекім ультрафіолеті за лайманівською границею відповідно на  $\lambda 955$  (взято зі статті [8], стрілками нами відзначено фази 0.35P та 0.85P спостережень полюсів магнітного поля на донорі) та на  $\lambda 1085$  (взято зі статті [9]); внизу – усереднена крива блиску у V-смузі (видимий діапазон спектру,  $\lambda 5500$ ; взято зі статті [1]).

Із аналізу усереднених кривих блиску системи  $\beta$  Ліри отримано ще один важливий факт стосовно розуміння її природи: виявлені вторинні неорбітальні періоди, найбільш достовірний з яких має тривалість коло 283d [1,13]. А це, як показано в [14], має пряме відношення до наявності узгодженої системи вторинних періодів та резонансів, змінних у часі синхронно з ростом орбітального періоду  $\beta$  Ліри.

Спектр  $\beta$  Ліри віддавна інтригує своєю неординарністю: налічується принаймні шість систем спектральних ліній. У видимому діапазоні основним є те, що на звичайний В8-спектр яскравого компонента-донора накладаються сильні емісійно-абсорбційні лінії водню та гелію змінної структури їх профілів уздовж орбітального періоду. Вони були віднесені до т. зв. В5-спектру загальної газової оболонки  $\beta$  Ліри, що розширюється [15, 16]. Центри абсорбційних компонент у профілях цих ліній зміщені в сторону коротких хвиль. Згодом їх було розділено на дві групи ліній [17]. Більш численні широкі лінії (названі А-абсорбцією) з великою амплітудою змін у променевих швидкостях упродовж орбітальної фази (в межах приблизно від нуля до мінус 110 км/с і менших за параболічні [18]) утворюються у в'ялоподібних газових структурах, що направлені від донора до акретора й охоплюють його зі сторін обох квадратур (див. рис. 1). Вузькі і глибокі лінії В5-спектру, найсильніші з яких  $HeI\lambda 3889, 10830$ , що виникають від метастабільних рівнів і мало змінні з орбітальною фазою [19], названі В-абсорбцією. За своєю природою вони характеризують розріджене середовище і є швидкісним зоряним вітром із променевими швидкостями більшими за параболічні ( $\geq 120$  км/с відносно центру мас), відображаючи втрату речовини поза межі подвійної системи. Після відкриття магнітного поля [20] було показано [21], що рух газових мас, відображений динамікою А- і В-абсорбцій, контролюється магнітосферою магнітного поля донора.

Ознак абсорбційних ліній вторинного до світності компонента-акретора виявлено не було, що узгоджувалось із відомою моделлю системи  $\beta$  Ліри при пануючій до кінця 1950-х років теорії еволюції подвійних зір, коли яскравіший компонент вважався більш масивним [16]. Однак, при великій функції мас у 8.5  $M_{\odot}$  це приводило до неояснено великої сумарної маси зір подвійної системи, більшої за 70  $M_{\odot}$ .

У зв'язку з кардинальною зміною уявлень про еволюцію подвійних зір у механізмі «зміни ролей» [22], на передній край астрофізики 1960-х років вийшли спостереження тісних подвійних систем (ТДС) із нестационарними явищами та вивчення їх фізичних характеристик у порівнянні з моделями їх еволюції. До них відносилась масивна ТДС  $\beta$  Ліри. Стало ясно, що вторинний за світністю компонент-акретор має бути більш масивним (не виключалось його існування як чорної діри). Необхідними стали пошуки спектральних ліній з ознаками руху вторинного компонента і визначення мас обох компонентів безпосередньо зі спектру системи. Врешті, на базі отримання десятків спектрограм з високим розрізненням були виявлені неглибокі та широкі лінії [23], що відслідковували орбітальний рух акретора при відношенні мас  $q \approx 0.25$ . Однак, надійне відношення мас  $q \approx 0.223$  та маси в



2.9  $M_{\odot}$  і 13  $M_{\odot}$  відповідно для яскравого компонента-донора та вторинного за світністю компонента-акретора встановлено за спостереженнями 1990-1992 років на 2.6-м телескопі КрАО за допомогою ПЗ3-детектора низького шуму в лініях дублету кремнію SiIII $\lambda\lambda$ 6347,6371 [24,25]. Методично незалежні астрометричні спостереження  $\beta$  Ліри [26] дали подібний результат:  $q \approx 0.222$  та маси компонентів у  $2.83 \pm 0.18 M_{\odot}$  та  $12.76 \pm 0.27 M_{\odot}$ . Ці ж спостереження підтвердили видовжену еліпсоїдальну форму як донора, так і в ще більшій мірі акретора, що було пояснено заповненням порожнини Роша донором та видовженою дископодібною структурою довкола акретора. Важливо теж, що площа астрометричної орбіти нахилена до променя зору всього на два градуси, тобто спостереження ведуться у площині орбіти.

Дослідження хімічного складу та еволюційного стану системи  $\beta$  Ліри відображають особливості втрати маси яскравим донором, який домінує в її композиційному спектрі [27,28]. Видимий спектр ліній поглинання атмосфери донора належить в основному зорі типу В8III, але відповідає більш широкому діапазону ступенів збудження та іонізації спектральних ліній і суттєво змінний вздовж орбітальної фази. Зокрема, зміна мікротурбулентної швидкості від 5.5 км/с у квадратурах до 18 км/с на стороні донора, зверненій до акретора, свідчить про зміну густини атмосфери вздовж його поверхні, про еліпсоїдальність донора і значне заповнення ним порожнини Роша. Виявилось, що ні при яких модифікаціях фізичних параметрів не можна отримати «нормального» вмісту хімічних елементів для атмосфери донора з активною втратою речовини. Деяке наближення до нормального хімічного вмісту можна отримати при її незвичній стратифікації: лінії вищого потенціалу збудження, зокрема HeI, NII, CII, SiII, SiIII, формуються при вищій температурі та нижчому електронному тискові, а лінії FeI, CrI, TiI - при нижчій температурі у щільнішій атмосфері. Однак, в усіх варіантах моделі спостерігається надлишок He при дефіциті H, а також надлишок N порівняно з C та O. Аномальність хімічного складу атмосфери донора свідчить про те, що її речовина перероблена процесом вигорання H в реакціях CNO-циклу в надрах донора, що узгоджується з іншими дослідженнями, зокрема, [29]. З відкриттям магнітного поля на поверхні донора [20] було показано [28], що в його атмосфері спостерігається суттєвий надлишок хімічних елементів, наприклад, Si, Mn, Sc, які притаманні атмосферам магнітних зір. Згодом були виявлені кореляції змін магнітного поля донора із змінами еквівалентних ширин ліній атмосфери донора впродовж орбітальної фази [30] та впливу магнітного поля на процеси активного масопереносу в подвійній системі [21].

Отже, система  $\beta$  Ліри достатньо молода і знаходиться на еволюційній стадії завершення активного масопереносу від яскравого донора до значно масивнішого і замаскованого диском акретора. Частина багатой воднем атмосфери донора вже втрачено, відкриті збагачена He, N, та іншими хімічними елементами його атмосфера. Фізичні умови на поверхні здеформованого донора завдячують високому темпу втраті його маси. Ця стадія інтенсивного масообміну, проходячи з відображенням структури магнітного поля

донора, привела до утворення розвинутих навколозоряних газових структур, серед яких довкола недосвітного масивного акретора виділяється складної будови акреційний диск (див. рис. 1).

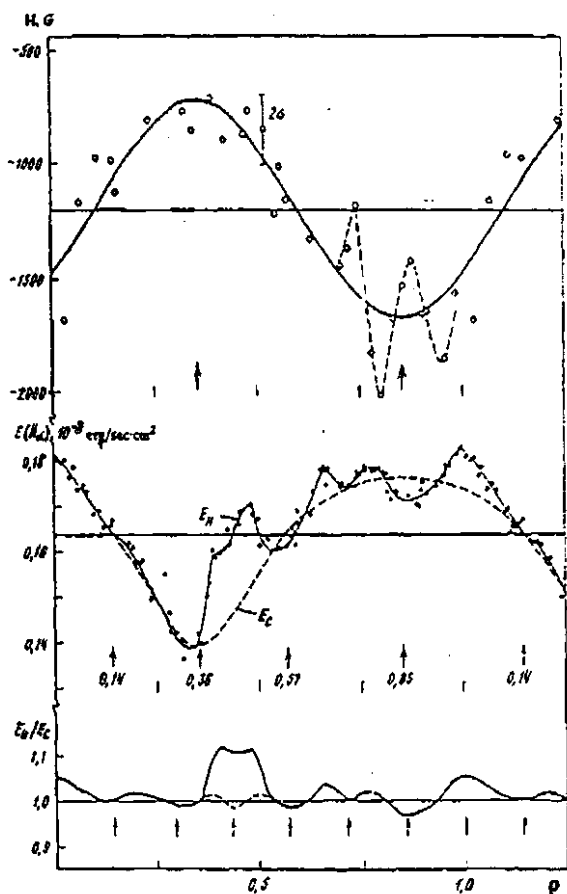
### Магнітне поле та його змінність у системі $\beta$ Ліри

Послідовне вивчення магнітного поля системи  $\beta$  Ліри було нами проведено за допомогою вимірювань зееманівських розщеплень у ліній синьої області спектру на основі 400 спектрограм високого розрізнення, отриманих в 1980-1988 рр. на 6-м телескопі САО [20,31,32]. Розв'язок квазісинусоїдальної кривої змінності ефективного магнітного поля атмосфери донора з орбітальною фазою дав середнє значення ефективної напруженості магнітного поля негативної полярності  $H_e = -(1198 \pm 32)$  Гс із амплітудою  $A = (475 \pm 51)$  Гс та екстремумами поля в орбітальних фазах 0.355P та 0.855P - (рис. 3, вверху). Крива змінності повздовжньої складової магнітного поля могла свідчити про дипольну структуру магнітного поля донора як ротатора. Тому, за методом, описаним в [33], були проведені розрахунки, які дали узгодження теоретичної та спостережуваних кривих змін магнітного поля з орбітальною фазою [31]. Моделювання показало, що вісь диполя магнітного поля, що направлена вздовж орбітальних фаз 0.35-0.85P, нахилена до площини орбіти на кут біля 30 градусів, а центр магнітного диполя зміщений від гравітаційного центра донора в напрямі до масивного акретора на 0.08 відстані поміж центром донора та центром мас подвійної системи. Отже, структура магнітного поля зі зміщеним диполем могла бути сформована на донорі через вплив масивного акретора. В цій структурі більш важливішою є область полюса магнітного поля на поверхні донора, яка спостережувана у фазах поблизу 0.85P. Цей полюс є суттєво наближеним до акретора і вісь диполя магнітного поля донора, що лежить у напрямі фаз 0.35-0.85P, поблизу фази 0.85P відхилена у сторону акретора (рис. 1).

Це передбачало виражені ефекти переносу замагніченої речовини вздовж силових ліній магнітного поля від донора до акретора саме у фазах другої квадратури, зцентрованих до фази 0.85P, що невдовзі було продемонстровано в [34]. В той же час велись спостереження з метою незалежного підтвердження магнітного поля. Зокрема, за даними абсолютної спектрофотометрії 1974 та 1984 рр. в спектрі  $\beta$  Ліри була виявлена і досліджена депресія на  $\lambda 5200$ . Обидва максимуми її еквівалентних ширин спостерігаються в тих же орбітальних фазах, що й зони полюсів магнітного поля на донорі [31]. Така синхронність змін депресії в континуумі на  $\lambda 5200$  зі зміною магнітного поля донора слугує незалежним підтвердженням його магнітного поля [35]. Таким чином, за даними спостережень на 6-м телескопі САО на кінець 1980-х років знання про магнітне поле системи  $\beta$  Ліри виглядали досить впорядкованими.

Програма подальшого вивчення феномену магнетизму в системі  $\beta$  Ліри виконана в 1991-1992 рр. на досконалішому типі апаратури 2.6-м телескопу КрАО [36]. Для вимірювання розщеплення поляризованих компонент спектральних ліній використовувався стоксметр у режимі аналізатора кругової поляризації та ПЗ3-детектор низького шуму. Вимірювання повздовжньої

складової ефективної напруженості магнітного поля на основі ефекту Зеемана проводилось у лініях поглинання дублету  $\text{SiII}\lambda\lambda 6347,6371$ , оскільки, на жаль, лише цей дублет кремнію спектру  $\beta$  Ліри чітко проявлявся в межах  $\lambda\lambda 5800-6400$  як у робочій області стокметра. Змінне з фазою орбітального періоду магнітне поле зафіксоване в обох лініях дублету, відслідковуючи спектрографічну криву  $H_e=f(P)$ , отриману в 1980-х роках. Зокрема, в лінії  $\text{SiII}\lambda 6371$  екстремально різкі зміни магнітного поля в межах від  $+150$  до  $-200$  Гс фіксуються поблизу фаз магнітних полюсів донора. Поле, як і очікувалось, виявилось значно меншим за величиною від усередненого магнітного поля, виявленого у синій області спектру на 6-м телескопі САО. Вірогідно, дублет кремнію  $\text{SiII}\lambda\lambda 6347,6371$ , який обрамлений емісією (він теж спостерігається в стікаючих атмосферах Ве-зір, Вольфа-Райє та Р Лебеда), формується у верхніх шарах атмосфери донора і відображає падіння магнітного поля з висотою.



**Рис. 3.** Вгорі – крива зміни магнітного поля донора з орбітальною фазою; у центрі – спектрофотометрія  $\beta$  Ліри: кореляція абсолютного потоку випромінювання в лінії  $H_\alpha$  з магнітним полем донора; внизу – 20%-й зріст цього потоку в лінії  $H_\alpha$  у фазі  $0.40P$  як результат ударного зіткнення з диском газового потоку, відхиленого силами Коріоліса (див. рис. 1).

У фазах квадратур, коли яскравість  $\beta$  Ліри максимальна, а лінії обох компонентів у спектрі максимально віддалені, були також здійснені пробні вимірювання магнітного поля в лініях  $\text{SiII}\lambda\lambda 6347,6371$ , відповідальних за орбітальний рух акретора. У трьох із п'яти орбітальних фаз спостережень магнітне поле

зафіксоване достовірно, з похибкою понад  $3\sigma$ . Наприклад, значення ефективної напруженості магнітного поля акретора, виміряне в лінії  $\text{SiII}\lambda 6347$  у фазі  $0.857P$  (тобто у фазі проходження через меридіан полюса магнітного поля донора) становило  $H_e = -(509 \pm 141)$  Гс. Можна припустити існування взаємодії (магнітозчеплення) між магнітними полями донора та акретора в межах спільної магнітосфери подвійної системи  $\beta$  Ліри.

В цій аспекті цікавим є феномен циклічних змін еквівалентних ширин ліній поглинання донора. Спершу в його атмосфері був виявлений надлишок хімічних елементів, притаманних атмосферам магнітних зір [28]. Згодом були виявлені кореляції змін магнітного поля донора зі змінами еквівалентних ширин ліній атмосфери донора впродовж орбітальної фази та впливу магнітного поля на процеси активного масопереносу [21, 30]. Зокрема, на основі ПЗЗ-спостережень були зафіксовані відмінності в кривих  $W_\lambda=f(P)$  абсорбційних ліній дублету  $\text{SiII}\lambda\lambda 6347,6371$  із близькими рівнями збудження, які показували також дещо відмінний хід зміни з орбітальною фазою і магнітного поля. Дослідження таких кривих  $W_\lambda=f(P)$  для сотні ліній у синій області спектру [30] виділило поведінку трьох груп ліній. До першої групи належать лінії, криві  $W_\lambda=f(P)$  яких піддаються орбітальній модуляції. Другу групу представляють лінії, що чіткіше корелюють зі змінністю магнітного поля донора з орбітальною фазою. Проміжна група ліній демонструє пофазні зміни водночас у гравітаційному та магнітному полях. Отже, на фізичних умовах на поверхні донора відображається спільна конфігурація як лінії центрів обох компонентів у напрямі орбітальних фаз  $0.5-0.0P$ , так і осі магнітного поля донора у напрямі фаз  $0.35-0.85P$ . Цей феномен відображає теж специфіку зміни умов збудження та магнітного поля з висотою в атмосфері вздовж zdeформованої поверхні донора, що прослідковується при дослідженні ліній високих членів бальмерівської серії водню, практично не спотворених емісією [30]. Феномен циклічних змін еквівалентних ширин ліній поглинання донора набув рис, для якого нема аналогів, ставлячи під сумнів адекватність моделі простого диполя природи магнітного поля донора.

Моніторингові спостереження  $\beta$  Ліри на тій же апаратурі КрАО проводились також в 1993-95 рр. та 2000-04 рр. у синій області спектру, а в 2006 р. знову в області дублету  $\text{SiII}\lambda\lambda 6347,6371$ . На жаль, ні разу не вдалось покрити спостереженнями весь орбітальний період. Магнітне поле в 1993-95 рр. при середньому значенні в 360 Гс позитивної полярності змінювалось в межах 530 Гс, а спостереження 2000 р. зафіксували середнє значення магнітного поля негативної полярності близьким до нуля [37, 38]. Однак, у значній кількості нічних спостережень магнітне поле зафіксоване достовірно, з похибкою понад  $3\sigma$  в межах від  $+700$  до  $-800$  Гс. До речі, спостереження впродовж одного орбітального циклу влітку 1999 р. у Катанській обсерваторії [39] показали усереднене магнітне поле позитивної полярності в 1300 Гс, однак спостереження того ж року в САО [40] не підтвердили цього. Отже, магнітне поле вимагає пода-

льшого вивчення за умови систематичних спостережень системи  $\beta$  Ліри вздовж орбітальної фази.

Тим не менше, багато фактів свідчать про те, що процес втрати маси донором (особливо в другій квадратурі) проходить вздовж осі диполя його магнітного поля, зорієнтованого у просторі подвійної системи в напрямі орбітальних фаз 0.35-0.85P. Така просторова структура магнітного поля донора, що виявлена на основі спостережень  $\beta$  Ліри 1980-1988 рр. на 6-м телескопі САО та підтверджена 1991-1992 рр. на 2.6-м телескопі КрАО (див. рис. 1,3), наразі є базовою для аналізу процесів масопереносу в подальшому викладі. Картину міжсезонної змінності ефективної напруженості магнітного поля вірогідно можна пояснити в гіпотезі відображення прецесійного руху осі диполя магнітного поля донора в результаті магнітозчеплення з магнітним полем акретора та прецесійного руху замагніченого акреційного диску.

### Вивчення феномену ліній-сателітів у спектрі $\beta$ Ліри та дискова структура довкола акретора

Уявлення про дископодібну структуру навкруги акретора, включаючи проблему його орбітального руху, сформована в основному на базі комплексу власних спектральних досліджень системи  $\beta$  Ліри. Стояла задача детального вивчення феномену ліній-сателітів як системи ліній, що спостерігаються поблизу ліній атмосфери яскравого донора у фазах  $\pm 0.1P$  до і після центру затемнення донора, коли замаскований диском акретор знаходиться перед спостерігачем. Ця оригінальна система ліній поглинання з променевими швидкостями орієнтовно в межах  $\pm 250$  км/с міняє знак цих швидкостей на протилежний при проходженні головного затемнення.

Історично, тлумачення феномену ліній-сателітів, як ліній, що формуються в результаті поглинання світла в газових потоках при їх проекції на яскравий компонент, було однією із визначальних рис відомої моделі системи  $\beta$  Ліри [15, 16]. У цій моделі фіолетові сателіти, тобто лінії поглинання з негативними променевими швидкостями, що найінтенсивніші у фазах довкола 0.05P, відображаються в спектрі як рух основного газового потоку, що прямує від донора і спостерігається позаду акретора. Обігнувши акретор, цей потік рухається перед акретором вже в сторону донора, проявляючись у спектрі найвиразніше в орбітальних фазах коло 0.95P червоними сателітами, як лініями поглинання з позитивними променевими швидкостями.

Базуючись на вимірах променевих швидкостей ліній-сателітів, нами запропоновано інше пояснення [41] феномену ліній-сателітів. За ним цей феномен проявляється у спектрі  $\beta$  Ліри в результаті ротаційного ефекту зовнішнього краю газового диску-кільця, яким охоплений акретор. Лінії-сателіти формуються при поглинанні випромінювання яскравого донора в спектрі системи не в газових потоках, а в найзовнішніших краях акреційного диску. Цей диск у фазах перед головним затемненням проектується на промені зору тим боком диску, край якого обертається від спостерігача на донор, що і проявляється у спектрі системи позитивними швидкостями червоних сателітів. Зразу ж після центру затемнення на донор проектується другий край диску, який обертається в напрямі від донора на спо-

стерігача, проявляючись у спектрі системи фіолетовими лініями-сателітами з від'ємними променевими швидкостями. Отже, лінії-сателіти спектра  $\beta$  Ліри формуються при почерговій проекції зовнішнього краю диску акретора (disk-rim) на яскравий донор (рис. 1).

Ця проста гіпотеза підтвердилась при подальшому вивченні феномену ліній-сателітів як за спектрофотограмми високого розрізнення, так і за допомогою ПЗЗ-детектора низького шуму, встановленого в фокусі куде 2.6-м телескопу КрАО [21, 25, 42]. Досліджувалось явище виникнення, розвитку і зникнення ліній-сателітів HeI, H, MgII, SiII у фазах головного затемнення на базі виміру їх променевих швидкостей та еквівалентних ширин. Крім власних даних (рис. 4, вгорі), в аналізі використовувались дані вимірів променевих швидкостей ліній-сателітів із [16, 43]. Для прикладу, на рис. 4 за ПЗЗ-спостереженнями 1991-92 рр. [42] проілюстровано хід появи і зникнення ліній-сателітів дублету SiII $\lambda$ 6347,6371 у фазах  $\pm 0.1P$  до і після центру затемнення донора акретором.

Основні результати наших досліджень такі.

Переміщення ліній-сателітів у спектрі стратифіковане. Криві променевих швидкостей ліній-сателітів різного ступеня збудження вказують на просторову стратифікацію їх формування у диску. Найбільшу амплітуду змін мають лінії-сателіти гелію (біля +240 км/с в фазах до та -295 км/с у фазах після центру затемнення), лінії кремнію показують середню амплітуду змін, відповідно +215 та -280 км/с, лінії магнію показують ще менші зміни, відповідно +210 та -250 км/с. Врахування швидкості центру мас подвійної системи  $\gamma = -18$  км/с веде до висновку, що від'ємні швидкості в диску після центру затемнення дещо більші за позитивні швидкості перед затемненням. Отже, спостерігається фазова асиметрія динамічних характеристик ліній-сателітів. При цьому, максимуми променевих швидкостей на  $V_r$ -кривих знаходяться в межах фаз 0.035-0.045P перед центром затемнення (тобто у фазі  $\approx 0.96P$  – теж див. рис.1) і в межах фаз 0.015-0.025P – після нього. Найближче по фазі до центру затемнення розташований максимум  $V_r$ -кривої ліній-сателітів гелію, отже, сформованих при вищій температурі. Лінії-сателіти щезають і знову виникають теж асиметрично відносно центру затемнення: перед затемненням вони щезають приблизно у фазі 0.980P, а після нього виникають приблизно у фазі 0.005P, будучи тут відсутніми у спектрі в межах інтервалу понад 0.02P, відображаючи границі внутрішньої ущільненої частини диску.

Залежності еквівалентних ширин від орбітальної фази на  $W_\lambda$ -кривих ліній-сателітів (рис. 4, внизу) показують такі межі їх зародження і зникнення в спектрі системи: 0.89-0.98P перед центром затемнення та 0.01-0.11P після центру затемнення при досягненні максимуму  $W_\lambda$  відповідно у фазах 0.95P та 0.05P. При цьому максимуми на  $W_\lambda$ -кривих попадають на висхідну (до затемнення) та низхідну (після затемнення) вітки променевих швидкостей ліній-сателітів на їх  $V_r$ -кривих.

Враховуючи виявлені закономірності явища ліній-сателітів, на рис. 1 схематично була відображена і модель сателіт-диска.

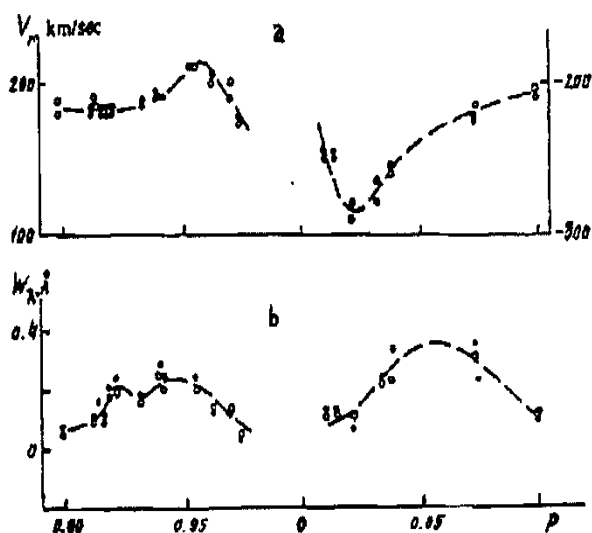


Рис. 4. Хід появи, розвитку і зникнення ліній-сателітів дублету SiII $\lambda$ 6347,6371 за ПЗ3-спостереженнями 1991-92 рр. [42] у фазах  $\pm 0.1P$  до і після центру затемнення донора акретором (див. рис.1). Вгорі (a) – променеві швидкості, внизу (b) – еквівалентні ширини.

Сателіт-диск має видовжену овальну форму, витягнута в напрямі руху акретора. Стратифікація умов збудження різних ліній-сателітів та їх  $V_r$ -криві вказують на те, що температура сателіт-дису та його швидкість обертання зростає в напрямі його центру. З тильного боку акретора променева швидкість на його краю є дещо вищою при більшій оптичній товщі проєктованого на донор газу (вклад в  $W_\lambda$  збільшений за рахунок основного газового потоку, що йде від донора через внутрішню точку Лагранжа і, обходячи акретор із тилу, «підтискає» щільнішу внутрішню складову диску до центру акретора). Отже, ліній-сателіти формуються у найзовнішніх шарах диску акретора (disk-rim), які стратифіковані за температурою та променевими швидкостями.

Таким чином, ПЗ3-спостереження 1991-92 рр. явно свідчать принаймні про двоскладову структуру акреційного диску. Внутрі сателіт-дису знаходиться ущільнена і непрозора складова диску акретора із замаскованою в його центрі зорею не цілком встановленої природи (балдж акретора). Однак саме в цьому балджі формуються лінії поглинання SiII $\lambda$ 6347,6371 акретора, що відслідковують його орбітальний рух з амплітудою біля  $\pm 42$  км/с [25,42]. Внутрішня ущільнена складова диску несиметрична щодо центру затемнення і теж видовжена в орбітальній площині в напрямі руху акретора, що і проявляється межами зникнення ліній-сателітів у фазах 0.98-0.005P. В той же час навколо акретора обертається як достатньо автономна зовнішня складова акреційного диску, а саме, сателіт-диск: його швидкість зростає до центру, вона до трьох разів більша за швидкість осьового обертання акретора і водночас у шість разів переважає швидкість орбітального руху акретора навколо центру мас.

В результаті комплексного дослідження змін всіх спектральних характеристик ліній дублету SiII $\lambda$ 6347, 6371, проведеного окремо для кожного сезону ПЗ3-спостережень  $\beta$  Ліри за 1991-92 рр., зафіксовані певні зміни параметрів і міжсезонний поворот видовженої

осі сателіт-дису [42]. В сезоні 1992 р. лінії-сателіти спостерігались на виході із затемнення значно раніше - вже у фазі 0.005-0.01P проти 0.02P у 1991 р.; швидше по фазі зафіксоване і зростання еквівалентної ширини ліній-сателітів - у фазі 0.93P замість фази 0.95-96P у 1991 р. В цій же фазі 0.93P сезону 1992 р. вирівнялися еквівалентні ширини ліній поглинання обох зір-компонентів, тоді як таке вирівнювання в 1991 р. припало на фазу 0.96P. Локальний глибокий мінімум  $W_\lambda$ -кривих емісійної складової обох ліній дублету SiII $\lambda$ 6347,6371, що припав на фази 0.97P і 0.93P відповідно для сезонів спостережень 1991 р. та 1992 р., можна було пояснити лише зміною умов локального затемнення диском області формування цієї емісії (зокрема, в напрямі на область магнітного полюса на донорі, звернену до акретора). У комплексному розгляді всіх спектральних відмінностей прослідковується явна відмінність умов проєкції на поверхню яскравого донора сателіт-дису із-за зміненої їх відносної конфігурації. Приблизно за рік відбувся поворот осі видовженого диску в сторону донора на кут біля 50 градусів, так що у сезоні 1992 р. довга вісь диску вже спостерігалась нахиленою до центру донора [42]. Слід відзначити, що криві блиску в околі первинного мінімуму підтверджують таку ідею, виразно показуючи подібні зміни впродовж років та десятків років спостережень як у їх формі і глибині, та і в фазових зсувах епох центру затемнення [44].

Відмінності у спостереженнях впродовж сезонів 1991 та 1992 років передбачають обертання сателіт-дису довкола акретора з тривалістю або понад шість років, або менше одного року. Цей факт можна трактувати і як повільне обертання лінії апсид видовженого диску з прецесійним періодом. Виникла потреба визначити параметри обертання автономного сателіт-дису як цілого, перш за все, його радіус і період. Використовуючи  $W_\lambda$ -криві та  $V_r$ -криві різних груп ліній-сателітів, колоріндекси та монохроматичні криві блиску [35, 42, 45, 46], отримуємо усереднені ефективні крайові радіуси зовнішнього та внутрішнього країв сателіт-дису:  $R_{rim}=0.452A$  та  $R_{in}=0.295A$ , де  $A$  – відстань між центрами зір-компонентів. Радіуси цих країв диску відповідають границям спостережуваних променевих швидкостей, що зростають приблизно від 210 км/с на найбільш зовнішньому краю диску (disk rim) при  $R_{rim}=0.452A$  до 270 км/с всередині сателіт-дису при  $R_{in}=0.295A$ . Отже, сателіт-диск шириною  $\Delta R \approx 0.15A$  дійсно бачиться як автономне утворення зовнішньої частини акреційного диску. Воно обертається навкруги більш щільної і масивної центральної частини акреційного диску, яка камуфлює акретор від спостерігача, відображаючись як псевдоатмосфера в його орбітальному русі.

Оцінка прецесійного періоду сателіт-дису базується на ідеї про те, що максимальний розмір акреційних дисків є функцією відношення мас зір-компонентів у подвійній системі [47]. Для відношень мас донора і акретора  $q \leq 0.3$  (які характерні і для катаклізмичних змінних, зокрема, подвійних типу SU Uma) існує просте співвідношення [48] між  $q$ , відстанню поміж центрами компонентів  $A$ , зовнішнім критич-

ним радіусом диску  $R_{rim}$ , орбітальним періодом подвійної  $P$  та прецесійним періодом диску  $P_{pr}$ :

$$P_{pr} = \frac{4}{3} P (R_d/A)^{-\frac{3}{2}} (q+1)^{\frac{1}{2}} q^{-1} \quad (1)$$

Для параметрів системи  $\beta$  Ліри при відношенні мас  $q=0.222$  і  $R_{rim}=0.452A$  період прецесії сателіт-диску згідно формули (1) становить 282.5d. Важливо, що ця величина прецесійного періоду співпадає з вторинним періодом в 282.425d, визначеним із  $V$ -кривої блиску системи  $\beta$  Ліри [1]. Скориставшись формулою (1) для внутрішнього радіусу сателіт-диску  $R_{in}=0.295A$ , отримуємо період прецесії на внутрішньому краю диску практично рівним 565d. При спостережуваних променевих швидкостях ліній-сателітів у 208 та 266 км/с на зовнішньому та внутрішньому краях сателіт-диску відповідні їм періоди обертання речовини на цих краях в одиницях орбітального періоду співвідносяться як  $0.5P : 0.25P = 2 : 1$  (октава), тобто внутрішня частина диску обертається вдвічі повільніше.

Виявлений резонанс, як відображення просторової форми сателіт-диску, поставив питання щодо дискретності структури цього диску. Так, при моделюванні деяких кривих блиску системи  $\beta$  Ліри, крім достовірно відомого вторинного періоду біля 283d [1,13], були виявлені періоди тривалістю в 423d і в 340d [49]. На частотному спектрі період у 340d був значно потужнішим за добре відомий період у 283d. Це вказує на те, що всередині сателіт-диску можливі структурні його складові з періодами прецесійного обертання у відношеннях простих чисел  $6 : 5 : 4 : 3$ , якщо взяти до уваги період у 565d як період прецесії на внутрішньому краю сателіт-диску. Отже, слід допустити, що сателіт-диск здатний з часом дискретно переструктуризуватися, за що може відповідати зміна темпу переносу маси поміж компонентами.

На базі уявлення про припливні хвилі в подвійних системах [50] при врахуванні наявної просторової структури магнітного поля донора також показано, що вторинний період  $T=282.425d$  [1] може бути рівним періоду припливної хвилі на поверхні донора і виявило набір періодів і резонансів, змінних з ростом орбітального періоду [14]. Тоді період биття орбітального періоду та осевого періоду донора має величину 564.85d і є фундаментальним, а період  $T=282.425d$  є його першою гармонікою і, як період припливної хвилі, чіткіше проявляється у спостереженнях. Трудно не зауважити, що обидва ці періоди резонансно співпадають за величиною з прецесійними періодами на внутрішньому та зовнішньому краях сателіт-диску.

Співпадіння величин цих періодів, як і наявності певної системи періодів, свідчить про резонансні процеси, узгоджені зі зміною орбітального періоду  $\beta$  Ліри [14,51]. Змінна в часі система періодичностей та резонансів є явищем, теоретичним підґрунтям якого є концепція параметричного резонансу. Змінним у часі параметром є маса донора, що веде до зростання орбітального періоду і поступових змін у всій самоузгодженій системі періодів. Взаємодією цих періодів, зокрема, їх биттям, можна пояснити зміни у масі газу, що втрачається донором, включаючи процеси, що ведуть до перебудови акреційного диску.

## Про локалізацію гарячих областей на акреційному диску і феномен замагніченості газових структур у системі $\beta$ Ліри

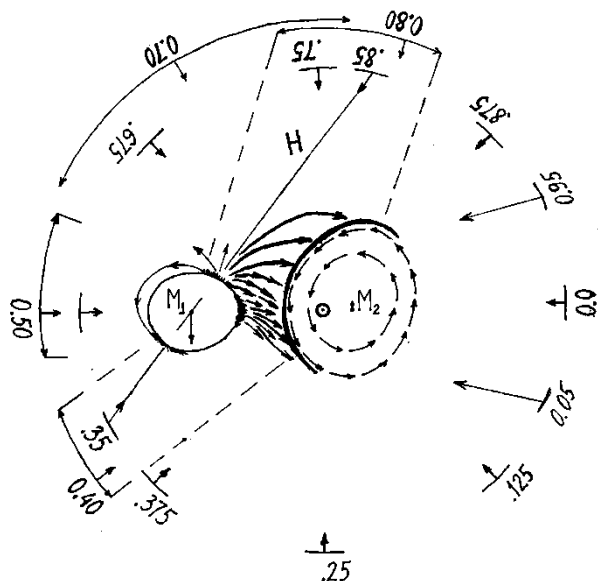
Викладена інформація про систему  $\beta$  Ліри, про структуру її магнітного поля і акреційного диску дозволяє висвітлювати спостережувальні аспекти впливу магнітного поля на формування газових колозоряних структур, їх динаміку та енергетику. Її слід враховувати при інтерпретації багатьох досліджень цієї системи, зокрема, і стосовно результатів недавніх моделювань  $V$ -кривої блиску системи  $\beta$  Ліри [4].

У цій статті вказується на вагомий вклад випромінювання акреційного диску, до 22% у квадратурах, у криву блиску всієї системи (що підтвердило результати спектродетекції  $\beta$  Ліри [12]). Але акцентується увага на тому, що моделюванню краще відповідають дві гарячі області із температурами, які на 10% та 20% є вищими за усереднені на ободі диску (disk rim). Вони локалізовані у фазах 0.80P і 0.40P із покриванням відповідно у 30% та 10% зовнішнього краю диску. Вважається, що ці розігріті області могли виникнути шляхом зіткнень газових потоків з диском при переносі маси поміж компонентами, але без пояснення механізму формування таких потоків.

Розглянемо цю ситуацію детальніше. Гаряча область на акреційному диску в фазах біля 0.40P першої квадратури природно пояснюється ударним розігрівом газовим потоком поверхні диску у відомій гідродинамічній картині. Газовий потік, що направлений від донора через внутрішню точку Лагранжа в порожнину Роша акретора, прискорюється в ній і відхиляється коріолісовими силами від лінії центрів зір, атакуючи диск з тильної сторони акретора відносно його орбітального руху (див. рис. 1, 5). Насправді, локалізацію гарячої плями на акреційному диску в фазах біля 0.40P, як області зіткнення потужного газового струменя з диском, що привело до його нагріву, було чітко виявлено спектродетекційним методом [46] як області 20%-го зростання абсолютного потоку випромінювання в  $H_{\alpha}$ -емісії – див. рис. 3, внизу. Ця область біля фаз 0.40P спостерігалась і як депресія на кривій поляризації у багатьох дослідженнях, що, зокрема, в [52] інтерпретується як збурення структури акреційного диску. Однак, у подібній гідродинамічній картині газові потоки не можуть випереджати акретор, атакуючи диск спереду фронтального руху акретора, тобто в ній неможливо пояснити широку гарячу область акреційного диску, спостережану у фазах другої квадратури довкола фази 0.80P як згідно моделювань  $V$ -кривої блиску у статті [4], так спектродетекції  $H_{\alpha}$ -емісії [46].

Без сумніву, утворення гарячої області на акреційному диску, спостережаній у фазах довкола 0.80P, має іншу природу. Можна вважати, що її формування відбувається в результаті зіткнення з диском газових потоків, каналізованих магнітним полем донора в напрямі осі диполя магнітного поля донора 0.35-0.85P. У меридіальних фазах 0.80-0.90P спостереження полюса магнітного поля на донорі ці потоки направлені на спостерігача з подальшим поворотом до фронтальної сторони акретора (рис. 1, 5). Важливо, що енергетичний ефект від зіткнення газу, направленою вздовж

силових ліній магнітного поля до акреційного диску, у фазах спостережень довкола 0.80P підсилюється зустрічним обертанням зовнішніх країв диску (як відомо, в них формуються червоні лінії-сателіти (рис. 1, 4)), а у фазах 0.55-0.70P і гравітацією масивного акретора при русі газових потоків у межах його порожнини Роша – див. рис. 1,5. Підтвердження такого розуміння природи явища масопереносу у системі  $\beta$  Ліри можна отримати, наприклад, з аналізу даних абсолютної спектродіагностики, кривих зміни променевих швидкостей та інтенсивностей спектральних ліній із фазами орбітального періоду в порівнянні з такими ж змінами магнітного поля. Звернемо увагу на основні факти, важливі в цьому сенсі.



**Рис. 5.** Структура газових потоків між компонентами системи  $\beta$  Ліри (криві стрілки) при наявності магнітного поля донора (вісь 0.35-0.85P, "Н"), що приводить до гарячої півдуги на сателіт-диску, зверненої до донора (жирна лінія); реальні розміри сателіт-диску означено двома рядами стрілок, а кружком - центр мас подвійної системи. Стрілками відмічені фази 0.05P та 0.95P оптимальної проекції сателіт-диску на донор. Поле зору спостерігача обмежені гарячі області на диску (на центри компонентів) у фазах 0.40P та 0.80P (що виявлені в статті [4]) та інші напрями спостережень, зокрема, загальне бачення системи у фазі 0.70P (див. текст та рис. 1).

Почнемо зі спектродіагностики  $\beta$  Ліри [12], монохроматичні освітленості якої в абсолютних одиницях були винесені за межі земної атмосфери. Моделювання континууму системи  $\beta$  Ліри у всіх фазах в межах  $\lambda\lambda 3300-7400$  показало, що в розподілі енергії випромінювання до 22% в обох квадратурах належить іонізованому водню при температурі 20000 К. Такий вклад у континуум системи, особливо в області за бальмерівською границею, пояснювався ударним механізмом при зіткненні з акреційним диском основного потоку від донора, відхиленого коріолісовими силами від лінії центрів зір, що цілком природно у фазах 0.2-0.4P першої квадратури. Але до вивчення магнітного поля донора [31] не було ніяких передумов для задіяння ударного механізму до пояснення природи рекомбінаційного випромінювання водню в області фаз 0.6-0.9P другої квадратури (див. рис. 1, 5).

Можливість мотивованої інтерпретації цих результатів появилась у процесі подальшої абсолютної спектродіагностики  $\beta$  Ліри з акцентом на область спектру довкола сильної емісійної лінії  $H_{\alpha}$ , проведеної в КрАО у 1978-85 рр., та незалежних досліджень магнітного поля в атмосфері донора, проведених у САО в 1980-88 рр. [46]. Основний результат співставлення даних цих методично різних спостережень такий: у системі  $\beta$  Ліри наявна чітка кореляція залежності  $E(H_{\alpha})=f(P)$ , тобто змінності з орбітальною фазою абсолютного потоку випромінювання в  $H_{\alpha}$ -емісії, із залежністю  $H_{\alpha}=f(P)$ , тобто зі змінністю з фазою ефективної напруженості магнітного поля донора. Із рис. 3 видно, що екстремуми обох залежностей співпадають уздовж орбітальної фази. Широкий максимум випромінювання в  $H_{\alpha}$ -емісії поміж фазами 0.6-0.1P зцентрований до фази 0.85P другої квадратури, тобто до фази спостереження полюса магнітного поля на поверхні донора, який розташований ближче до акретора і звернений до нього віссю його дипольного магнітного поля (рис. 1, 5). У цих фазах другої квадратури енерговіддача в лінії  $H_{\alpha}$  в 1.3 раза є більшою порівняно із мінімумом її енерговіддачі, що припадає на фазу 0.35P магнітного полюса донора в першій квадратурі. Отже, формування  $H_{\alpha}$ -емісії у системі  $\beta$  Ліри явно зорієнтоване вздовж осі магнітного поля донора у напрямі фаз 0.35-0.85P з максимумом енерговіддачі у другій квадратурі. Саме у фазах довкола 0.80P спостерігається гаряча область на акреційному диску згідно моделювань V-кривої блиску у статті [4]. Дуже вірогідно, що ця область на диску виникає при зіткненні газу, направлено уздовж силових ліній магнітного поля до акреційного диску, розігрів якого підсилений зустрічним обертанням зовнішніх країв диску.

Звернемо ще увагу на те, що в межах фаз 0.35-0.50P на залежності  $E(H_{\alpha})=f(P)$  в області  $H_{\alpha}$ -емісії чітко виділяється локальний максимум потоку випромінювання, який становить 20 % над усередненою кривою цієї залежності (див. рис. 3, внизу). Тут безпосередньо зі спостережень локалізуються і межі гарячої області на ободі диску. Механізм його утворення - розігрів поверхні диску ударним зіткненням з газовим потоком під дією коріолісових сил у класичній гідродинамічній картині. До речі, в цьому ж фазовому інтервалі зафіксована «гаряча пляма» за допомогою BVRI поляризаційних кривих блиску [52], як локальне зменшення поляризації із-за турбулентних завихрень гарячої плазми (поляризація в основному породжена електронним розсіянням світла). Отже, локальний максимум потоку випромінювання в  $H_{\alpha}$ -емісії [46] підтверджує наявність гарячої області на ободі акреційного диску, виявлену в фазах поблизу 0.40P при моделюванні V-кривої блиску системи  $\beta$  Ліри [4]. Однак, у цих фазах теж можливі додаткові ефекти, пов'язані як з впливом магнітного полюса донора, центрованого до фази 0.35P, так із полегшеною втратою речовини крізь точку Лагранжа  $L_2$  біля поверхні донора у фазі 0.50P.

У цьому аспекті слід врахувати результати швидкої змінності  $H_{\alpha}$ -емісії як у фазах 0.35-0.50P, так і вздовж орбітальної фази. Оригінальними залишаються спостереження 1981 р. на дисекторному спектродіагностиці 6-м телескопу САО в області  $H_{\alpha}$ -емісії [53], коли було

отримано біля 700 спектрограмм з часом експозиції окремого скану переважно в 10.5 секунди. Діапазон спектру, центрованого на  $H_{\alpha}$ , становив 150Å та 450Å. Досліджувалась змінність спектру в послідовних експозиціях конкретної дати спостереження і рівень змінності швидкісних процесів з орбітальною фазою. Основні результати такого дослідження газових структур  $\beta$  Ліри зводяться до наступних. Зафіксовані флуктуації потоку з елементами еруптивності у профілях  $H_{\alpha}$ -емісії на часових відтинках секунди-хвилини. Активність змінності як у крилах, так і в центрі  $H_{\alpha}$ -емісії суттєво залежить від фази орбітального циклу. Вона практично відсутня в околі фаз ( $0.0P \pm 0.1P$ ) головного затемнення, коли акретором закрита область відтоку речовини з донора та її висвічування в ударних зіткненнях з диском, що цілком узгоджується з дослідженнями континууму  $\beta$  Ліри за її абсолютною спектрофотометрією [12]. При виході донора із затемнення флуктуації  $H_{\alpha}$ -емісії у фазах першої квадратури поступово наростають і сягають максимуму в фазах 0.34-0.49P, що пояснюється в рамках локалізації області ударного зіткнення з акреційним диском основного потоку від донора, зміщеного коріолісовими силами до тильного боку акретора. Однак найбільша змінність  $H_{\alpha}$ -емісії тут зафіксована в фазі 0.49P, коли донор практично закриває область зіткнення газового потоку з диском, але спостерігається поверхня донора в області магнітного полюса донора у фазі 0.35P. Зокрема, тут на послідовних 10-секундних експозиціях зафіксовані двократні звуження і розширення профілю  $H_{\alpha}$ -емісії, зміни в інтенсивності та еквівалентній ширині  $H_{\alpha}$ -емісії, виникнення емісій-супутників довкола центру емісії в межах до  $\pm 1700$  км/с, раптову появу абсорбцій зі швидкостями до -1000 км/с від центру лінії. Отже, додаткова емісія, швидкісні флуктуації потоку емісії і променевих швидкостей супутніх деталей у флуктуаціях профілю  $H_{\alpha}$ -емісії можуть свідчити у фазах 0.34-0.49P про важливість зони на поверхні донора поблизу його магнітного полюса і в сенсі каналізації речовини вздовж силових ліній між полюсами магнітного поля донора.

Друга область підвищеної активності  $H_{\alpha}$ -емісії спостерігається у фазах 0.60-0.85P другої квадратури, тобто в фазах спостереження того полюса магнітного поля донора, який розташований ближче до акретора і звернений до нього, тобто у фазах спостереження ударних зіткнень гарячої плазми, каналізованої магнітним полем, з акреційним диском. Відмітимо незвичну подію, що тривала на шести сканах впродовж однієї хвилини у фазі 0.81P, тобто практично у фазі фронтального спостереження полюса магнітного поля на донорі. На цих послідовних сканах спектру  $\beta$  Ліри зафіксовано рух абсорбції, що виникла з фіолетової сторони на відстані -2200 км/с відносно центру  $H_{\alpha}$ -емісії і зникла, перемістившись на її червону сторону на відстань коло +1000 км/с. Ця абсорбція глибиною біля 15% висоти континууму і шириною до 1000 км/с переміщалась у спектрі зі швидкістю понад 50 км/с. В певний момент руху абсорбція частково «опустила» під континуум значно ослаблену центральну  $H_{\alpha}$ -емісію. Таке явище могло мати еруптивну складову і чітко свідчить про не ламінарні процеси в подвійній системі. Воно розвивалося подібно до руху речовини в арці потужного «тра-

нзента», коли газ спочатку рухається на спостерігача, а потім від нього, падаючи назад, скажімо, вздовж силових ліній магнітного поля. Інший важливий результат: під центральною  $H_{\alpha}$ -емісією з півшириною до 250 км/с виявлена інтенсивна (до 25% над рівнем континууму) емісія з незвично широкими крилами [53]. У фазі 0.73P ці крила простягались на  $\pm 3000$  км/с, тоді як за спектофотографічними спостереженнями [54] вони сягають біля  $\pm 500$  км/с. По аналогії із зорями тиру Р Лебеда, в спектрах яких теж спостерігаються дуже широкі крила в  $H_{\alpha}$ -емісії [55], найбільш вірогідним механізмом їх походження можна вважати томсонівське розсіяння на вільних електронах, тобто у фазах 0.60-0.85P спостерігаються потужні процеси ударного механізму. Це узгоджується як із абсолютною спектрофотометрією  $\beta$  Ліри, яка свідчить про іонізований водень при температурі 20000K [12], так і з наявністю сильних ліній спектру високого збудження та іонізації, скажімо, CІУ та NУ у далекому ультрафіолеті [56]. У фазах 0.55-0.80P реєструється і максимум випромінювання на кривій блиску за лайманівською границею, яка втратила ознаки подвійної системи [8,9].

Отже, у фазах другої квадратури, перш за все у фазах 0.55-0.90P (рис. 1, 6), результати абсолютної спектрофотометрії  $\beta$  Ліри як в її континуумі, так і в  $H_{\alpha}$ -емісії, включаючи реєстрацію швидкісних ударних процесів, мають інше фізичне підґрунтя. Природно вважати, що тут реєструється зіткнення з акреційним диском замагнічених газових потоків, каналізованих магнітним полем донора і відхилених ним вздовж силових ліній до акретора. Це зіткнення відбувається по всій півдзві обертового акреційного диску (рис. 1,5), але має підсилений енергетичний ефект від зустрічного руху речовини диску і падаючих на нього газових потоків, що і спостерігається як широка гаряча пляма на диску, центрована до фази 0.80P [4]. В той же час у фазах спостережень 0.55-0.7P інтенсивні зіткнення всередині плазми та газових потоків з диском із неупорядкованими збуреннями газових структур відбуваються на більшій довжині шляху променя зору і акреційний диск маскується гарячою плазмою, що більш явно проявляється на кривих блиску в далекому ультрафіолеті (рис. 2). Звідси слідує ще один висновок: переважне формування  $H_{\alpha}$ -емісії в просторі поміж донором і диском у фазах другої квадратури свідчить про значне її виникнення безпосередньо в близькому околі донора, тобто в швидкозмінних ударних процесах поблизу полюса його магнітного поля, зцентрованого до фази 0.85P. Важливим у цім аспекті є факт ослаблення емісій ліній дублету  $\text{SiII}\lambda\lambda 6347,6371$  в орбітальних фазах 0.9-0.98P [42], коли сателіт-диск проектується на поверхню донора і затемнює на ній область полюса магнітного поля донора, що звернена до акретора (лінії  $\text{SiII}\lambda\lambda 6347,6371$  з подібною формою профілів, обрамлених емісією, спостерігаються у витікаючих атмосферах зір Вольф-Райє, Р Лебеда та Ве-зір). Так як у лініях поглинання цього дублету кремнію виміряне магнітне поле [36], а ці лінії формуються у верхніх шарах атмосфери донора, то це є свідченням того, що, затемнюючись у фазах 0.9-0.98P диском у напрямі на полюс магнітного поля донора, емісія цих ліній як ціле формується поблизу поверхні донора.

До цих пір в основному розглядалися питання енергетичної складової у формуванні емісійних ліній як цілого, передусім  $H_{\alpha}$ -емісії. Коротко розглянемо і динамічні зміни з орбітальною фазою у контурах емісійно-абсорбційних ліній високого спектрального розрізнення. Ці лінії спектру  $\beta$  Ліри несуть інформацію про будову та динаміку навколосоряних газових структур. У видимій області спектру найпотужнішими є лінії водню  $H_{\alpha}$ ,  $H_{\beta}$  і  $H_{\gamma}$  та лінії гелію  $\text{HeI}\lambda\lambda 3889, 4471, 5875, 6678, 7065$ , змінність яких уздовж орбітальної фази багато в чому подібна. Найпоказовішим є профіль лінії  $H_{\alpha}$ . Перевищуючи інколи континуум у кілька разів та суттєво змінюючись із фазою, складний профіль цієї лінії завжди зберігає два емісійні піки та абсорбції поміж ними. Предметом аналізу є вимірювання доплерівських зміщень таких складових профілю ліній. Як правило, розглядається або модель їх незалежного формування, або модель єдиної емісії з абсорбцією, що прорізає емісію як самопоглинання в газових структурах. В цьому сенсі мало значення створення і вивчення (на підставі спостережень  $\beta$  Ліри 1985-90 рр. на 2.6-м телескопі за допомогою ПЗЗ-детектора низького шуму) каталогу  $H_{\alpha}$ -профілів високої спектральної розрізненості [18]. Це вперше дозволило дослідити четвертий динамічний фактор, а саме, зміщення у спектрі  $\beta$  Ліри центру  $H_{\alpha}$ -емісій по бісектору їх гауссівського профілю. Аналіз променевих швидкостей основних складових профілю лінії  $H_{\alpha}$  показав, що у формуванні динаміки газових структур теж домінує фактор магнітного поля донора.

Почнемо з розгляду поведінки абсорбційної складової лінії  $H_{\alpha}$  (абсорбція в інших сильних емісійно-абсорбційних лініях водню та гелію веде себе подібним чином), яка свідчить про активний масоперенос поміж компонентами. Специфіка цього типу ліній поглинання, названої нами А-абсорбцією [17], відображає формування віялоподібної (fan-shaped) системи газових потоків [18, 21], направленої від донора до акретора і спостережуваної в широкому діапазоні фаз 0.8-0.2P як поглинання в спектральних лініях при проекції на донор того газу, що рухається від донора до акретора (рис. 1, 5). Будучи змінною в широких межах променевих швидкостей, А-абсорбція показує в фазах 0.4-0.6P теплову стартову швидкість газу з поверхні донора, а в фазах 0.8-0.2P досягає максимальних швидкостей аж до -110 км/с (але менших за параболічні) в якості низько швидкісного анізотропного вітру, прискореного в напрямі акретора. При цьому відсутнє повне центральне затемнення цього вітру акретором, що свідчить про рух газу над площиною орбіти. В фазах 0.0-0.2P виходу донора із затемнення максимум негативної швидкості досягається у фазі біля 0.07P. Це узгоджується з класичною гідродинамічною картиною основного газового потоку, сформованого з тильного боку акретора коріолісовими силами і відхиленого від лінії гравітаційних центрів компонентів. Однак, у такій гідродинамічній картині неможливе формування газових потоків у напрямі фронтальної сторони акретора, тобто у фазах 0.8-0.0P, що передують входу донора в його затемнення акретором.

Поведінка А-абсорбцій у фазах 0.8-0.0P стала зрозумілою з відкриттям магнітного поля, коли були

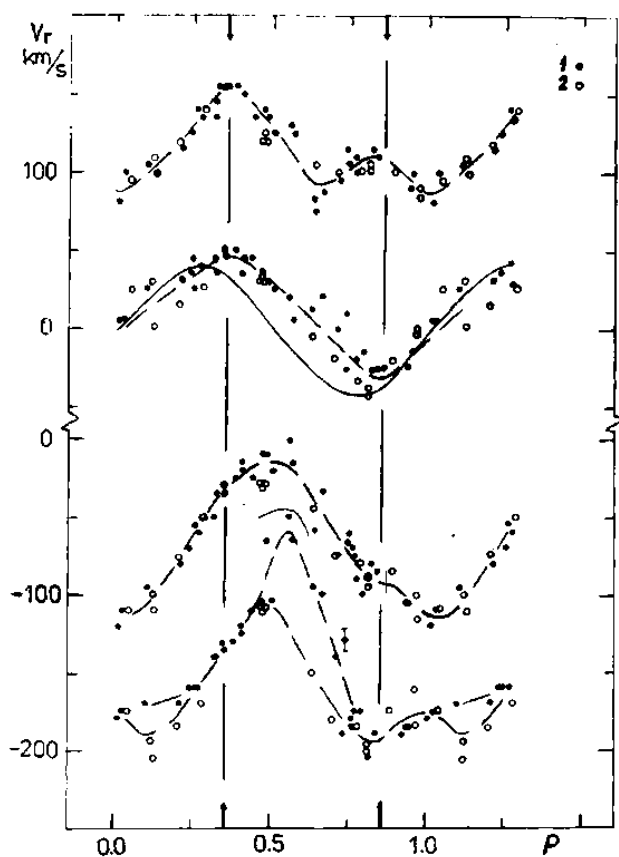
зауважені перші кореляції у змінності енергетичних та динамічних характеристик навколосоряних структур з просторовою структурою магнітного поля донора [34]. Це підтвердило детальніше вивчення А-абсорбції в лінії  $H_{\alpha}$  [18] та в інших лініях водню і гелію [21,57] на основі ПЗЗ-спостережень  $\beta$  Ліри 1985-1992 рр. На рис. 6 показані залежності деяких параметрів цих ліній від орбітальної фази. Нагадаємо, в межах фаз 0.8-0.0P, що передують входу донора в затемнення акретором, на поверхні донора спостерігається зона магнітного полюса донора, зцентрована до фази 0.85P (рис. 1, 5). Різниця фаз 0.85-0.0P відповідає відхиленню осі диполя магнітного поля донора, спроектованої на площину орбіти, відносно лінії 0.5-0.0P центрів зір-компонентів. Як видно з рис. 5, у фазах коло 0.85P на  $V_r$ -кривих А-абсорбцій формується локальний максимум негативних швидкостей, відображаючи початок прискорення газових потоків, що наростає до фази 0.0P. В фазах 0.8-0.0P рух газових мас проходить під контролем магнітосфери донора: витікаючи вздовж силових ліній магнітного поля із зони полюса на донорі, газ у зовнішніх частинах його магнітосфери попадає в зону гравітаційного впливу масивного акретора, де максимально прискорюється. Важливо теж, що А-абсорбція, яка у фазах 0.8-0.2P досягає максимальної швидкості на спостерігача (до -110 км/с, але дещо меншої за параболічну), має значну інтенсивність, хоч повинна б була суттєво затемнюватися акретором і його щільним диском, оскільки нахил площини орбіти до променя зору спостерігача становить лише два градуси [26]. Так як А-абсорбція формується в спектрі при проекції рухомого газу на яскравий донор, то значна частина газу, спроектованого на донор у центрі головного затемнення, рухається до акретора вище площини орбіти без затінення акретором і його диском. Це уможлиблюється суттєвим відхиленню осі диполя магнітного поля донора від площини орбіти (орієнтовно 30 градусів [31]) та просторовою конфігурацією акретора і достатньо сплющеного диску, що мають відносно менші від донора розміри у напрямі, перпендикулярному до площини орбіти.

Отже, у просторі  $\beta$  Ліри формується оригінальна віялоподібна система газових потоків в якості неізотропного зоряного вітру від донора, що з обох боків відносно лінії центрів зір 0.5-0.0P охоплює акретор. Ця система суттєво відрізняється від руху газових потоків в ТДС, обумовлених дією коріолісових сил у стандартній гідродинамічній картині, в якій ці потоки формуються тільки з тильного боку акретора відносно напрямку його орбітального руху і спостерігаються у фазах 0.0-0.2P першої квадратури. Формування і динаміка газових потоків у фазах 0.8-0.0P другої квадратури зумовлені просторовою орієнтацією магнітного поля донора, що тут є визначальною.

В сенсі формування замагнічених просторових газових структур чи не найпоказовішою є поведінка доплерівських зміщень центру сильних емісійних ліній як цілого з орбітальною фазою. Спершу цей принципово новий результат виявлений при вимірюваннях центру  $H_{\alpha}$ -емісій по бісектору їх гауссівського профілю на ПЗЗ-спектрограмах системи  $\beta$  Ліри, отриманих на 2.6-м телескопі КраО впродовж сезонів 1985-91рр.



[18]. Екстремуми  $V_r$ -кривої доплерівського зміщення з орбітальною фазою для центру  $H_\alpha$ -емісії, тобто залежності  $V_r=f(P)$ , співпали з екстремумами кривої ефективної напруженості магнітного поля донора, тобто залежності  $H_e=f(P)$  (рис. 3, 6).



**Рис. 6.** Променеві швидкості профілю лінії  $H_\alpha$  у зміні з орбітальною фазою (1 – ПЗЗ-спостереження 1990-91 рр., 2 – 1985-89 рр.): графіки вгорі та внизу стосуються відповідно червоних та фіолетових піків емісії; другий графік зверху – центру емісії (суцільна крива відповідає орбітальному руху акретора); другий графік знизу – А-абсорбції. Стрілками та рисками відзначено фази 0.35P та 0.85P спостережень полюсів магнітного поля донора.

Отже, доплерівські зміщення центру  $H_\alpha$ -емісії синхронно відстежують структуру магнітного поля донора. Ця важлива динамічна характеристика емісійно-абсорбційних контурів водню і гелію підтверджена [21, 42] вимірами центру сильних емісійних ліній  $HeI\lambda\lambda 6678,7065$  та ліній  $SiIII\lambda\lambda 6347,6371$  (показовою емісією ліній  $HeI7065$ , яка теж добре апроксимується гаусіаном [57]). До речі, така ж поведінка центру  $H_\alpha$ -емісії з орбітальною фазою проілюстрована в статті [1], де включені і наші дані, однак без згадки про магнітне поле донора. Тим не менше, в цій статті відмічено, що мінімум  $V_r$ -кривої для центру  $H_\alpha$ -емісії припадає на фазу 0.853P, що співпадає на залежності  $H_e=f(P)$  з фазою 0.855P, центрованою до полюса магнітного поля донора. Кореляція поміж обома кривими незаперечна.

Загалом, динамічні зміни з орбітальною фазою як центру  $H_\alpha$ -емісії, так і центру інших емісійних ліній, свідчать про те, що формування газових структур як цілого здійснюється при допомозі певним чином зоріє-

нтованого магнітного поля донора. Відображаючи процес переносу речовини, центр емісій цих ліній у значній мірі формується поблизу поверхні донора, охопленої магнітосферою. Якщо це припущення достовірне, то динаміка центру емісійних ліній повинна відображати орбітальний рух донора. Розглядаючи таку можливість, ще раз звернемося до рис. 6, другий графік зверху на якому демонструє залежність  $V_r=f(P)$  для променевої швидкості центру  $H_\alpha$ -емісії з орбітальною фазою за даними ПЗЗ-спостережень 1991-1992 років. Ідентична залежність отримана для центрів інших емісійних ліній, наприклад, сильних емісійних ліній  $HeI\lambda\lambda 6678,7065$  та ліній  $SiIII\lambda\lambda 6347,6371$  з відносно слабшою емісією [18, 21, 42]. Побудуємо графіки залежностей  $\Delta V_r=f(P)$ , як залежностей від орбітальної фази різниць  $\Delta V_r=\Delta(V_{rce}-V_{rk})$  між променевою швидкістю центрів емісій цих ліній і орбітальною швидкістю компонента (залежність  $\Delta V_r=f(P)$  для акретора в фазах магнітних полюсів в межах похибок близька до нуля і не виявляє чіткої змінності з фазою, що могло б свідчити про те, що значна частина емісії формується біля акретора).

Для донора отримуємо такі результати: всі центри емісій відносно донора мають максимуми, зцентровані до фаз полюсів його магнітного поля; у фазі 0.35P, центрованої до полюса магнітного поля донора у першій квадратурі, центр емісій досягає максимальної позитивної швидкості  $\Delta V_r=220-230$  км/с (газ направлений від спостерігача), а в орбітальних фазах поблизу фази 0.85P, центрованої на полюс магнітного поля донора у другій квадратурі, центр емісій має максимальну швидкість  $\Delta V_r=-200$  км/с (газ направлений до спостерігача); центр цієї синусоїдальної залежності має променеву швидкість коло +25 км/с відносно швидкості центру мас, що рівна тепловій швидкості відриву газу від донора. Це може свідчити про те, що, витікаючи з обох магнітних полюсів донора зі швидкістю, значно більшою за параболічну, газ, по-перше, рухається вздовж осі магнітного поля донора в напрямі фаз 0.35-0.85P, і, по-друге, в значній мірі формує профіль цих емісій поблизу поверхні донора. Особливо це притаманне емісіям ліній  $SiIII\lambda\lambda 6347,6371$ , вказуючи на наявність магнітосфери хромосферного типу, як деякого дископодібного утворення, сформованого вздовж осі магнітного поля. Стартуючи з поверхні донора і каналізуючись вздовж осі його дипольного магнітного поля, потік газу відхиляється до акреційного диску. Ефективніше це відбувається в зоні орбітальних фаз, центрованих до фази 0.85P магнітного полюса донора, наближеного до акретора.

Звернемося тепер до аналізу динаміки емісійних піків, як визначних структурних деталей у складних профілях емісійно-абсорбційних ліній спектру  $\beta$  Ліри. Крім того, необхідно проаналізувати доплерівські зміщення обох піків емісії у контурах ліній кілька раз іонізованих елементів, скажімо, вуглецю, азоту та кремнію в далекому ультрафіолеті. Попередній розгляд таких ліній водню та гелію передбачав їх формування в моделі єдиної емісії з абсорбцією, що прорізає емісію як самопоглинання в газових структурах. При цьому піки емісій формуються зміщеними від центрів ліній у червону та синю сторони спектру з більш інтенсивним червоним піком. З другого боку, слід розглядати і мо-

дель незалежного формування цих піків, враховуючи, наприклад, одне з традиційних пояснень утворення червоних та синіх піків у ротаційному обертанні газових дисків. Але у випадку  $\beta$  Ліри обертання зовнішніх країв диску акретора проявляється у спектрі системи зміщеннями абсорбційних ліній-сателітів, які значно відрізняються від доплерівських зміщень емісійних піків. Динаміка структур, в яких вони формуються, різна. Важливо вяснити, чи динаміка обох емісійних піків, що змінна з орбітальною фазою, відображає просторову структуру магнітного поля і рух речовини вздовж осі магнітного поля донора в напрямі орбітальних фаз 0.35-0.85P.

Змінність емісійних піків, як складових найсильніших у видимій ділянці спектру ліній водню  $H_{\alpha}$ ,  $H_{\beta}$  і  $H_{\gamma}$  та ліній гелію  $HeI\lambda\lambda 3889, 4471, 5875, 6678, 7065$ , подібна, перш за все, в тому, що червоний пік, домінує над фіолетовим піком практично вздовж всіх фаз орбітального періоду [18, 21, 57]. Крім того, у цих лініях на залежностях променевих швидкостей червоного піку від орбітальної фази виділяються два максимуми у фазах (зафіксовані й у відомих роботах [1, 43]), що не співпадають ні з квадратурами, ні з лінією центрів зір-компонентів 0.0P-0.5P. Для прикладу, на рис.6 показані максимуми залежності  $V_r=f(P)$  для червоного піка в лінії  $H_{\alpha}$ , що явно співпадають з фазами 0.35P і 0.85P полюсів магнітного поля, відображаючи залежність  $H_e=f(P)$ , тобто змінність з орбітальною фазою ефективної напруженості магнітного поля донора. Повна кореляція обох залежностей в їх змінності з орбітальною фазою підкреслює важливість фактору структури магнітного поля при формуванні цих піків, тобто при масопереносі. Променеві швидкості утворюють еліпс відносно центру мас у напрямі осі магнітного поля донора. Однак, менший за висотою максимум залежності  $V_r=f(P)$  у фазі 0.85P стане тут домінуючим, якщо побудувати залежність  $\Delta V_r=f(P)$ , де  $\Delta V_r$  є різницею між променевими швидкостями довгохвильового червоного піка та центру  $H_{\alpha}$ -емісії. Як видно з рис. 6,  $\Delta V_r$  є різницею між двома верхніми кривими і для фаз 0.35P і 0.85P полюсів магнітного поля вона становить біля 120 та 140 км/с, тобто більша параболічної швидкості в обох напрямках осі магнітного поля донора. Отже, поведінка довгохвильового інтенсивнішого піка  $H_{\alpha}$ -емісії свідчить про те, що саме у фазах напряму осі магнітного поля донора і, зокрема, у фазах  $0.85P \pm 0.10P$  реєструється пришвидшення газу аж до його відриву поза межі подвійної системи. Зауважимо, що при подібній динаміці емісійні піки лінії гелію  $HeI\lambda 7065$ , які у всіх фазах разом з абсорбцією знаходяться над континуумом, показують однакову висоту піків на кривій відношень інтенсивностей піків  $I_v/I_r=f(P)$  у фазі 0.35P та найменшу їх величину саме у фазах  $0.85P \pm 0.10P$ . Залежність  $I_v/I_r=f(P)$  для лінії  $HeI\lambda 7065$ , відображаючи напрям осі магнітного поля донора 0.35-0.85P, теж свідчить про витягнуте дископодібне утворення, сформоване навколо донора.

Отже, динаміка (як і енергетика) усіх складових найсильніших у видимій ділянці спектру ліній водню  $H_{\alpha}$ ,  $H_{\beta}$  і  $H_{\gamma}$  та ліній гелію  $HeI\lambda\lambda 3889, 4471, 5875, 6678, 7065$  відображає просторову структуру магніт-

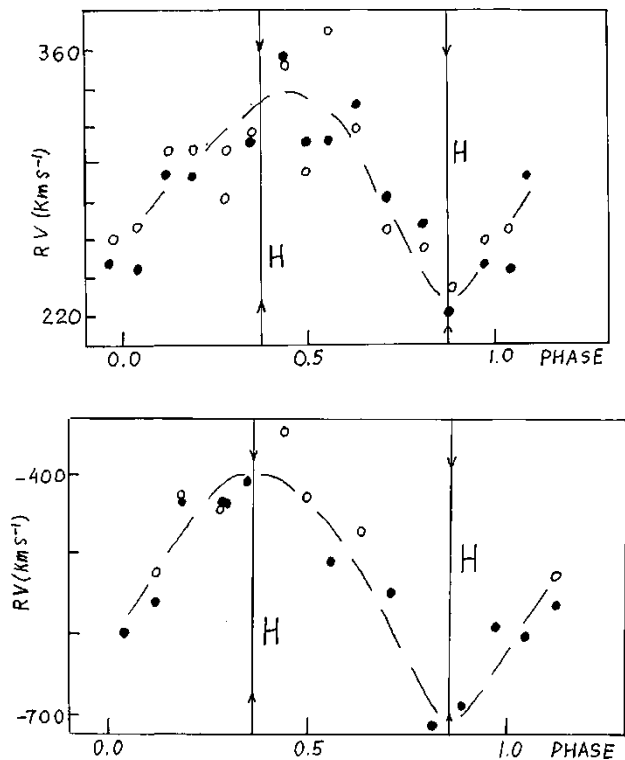
ного поля донора і рух речовини переважно вздовж осі магнітного поля донора в напрямі орбітальних фаз 0.35-0.85P з формуванням швидкісних переміщень газу поміж зорями-компонентами та понад диском акретора. Цим не підтверджується, зокрема, пропаговане уявлення про формування  $H_{\alpha}$ -емісії в біполярних джетах, що розвивається при ігноруванні досліджень магнітного поля системи  $\beta$  Ліри [1, 2].

У зв'язку з попереднім, важливими є залежності  $V_r=f(P)$  променевих швидкостей від орбітальної фази для доплерівських зміщень у профілях ліній іонізованих елементів у далекому ультрафіолеті [56]. Розглядаючи променеві швидкості абсорбцій, короткохвильових і довгохвильових емісійних піків, наприклад, у резонансних лініях магнію  $MgII\lambda\lambda 2795, 2802$ , в лініях кремнію  $SiY\lambda 1402$ ,  $SiIII\lambda 1301$ , азоту  $NY\lambda\lambda 1238, 1242$  чи вуглецю  $SP\lambda 1175$ , бачимо у всіх складових профілів ліній більш чи менш виражені кореляції їх залежностей із  $H_e=f(P)$ , тобто із змінністю з орбітальною фазою ефективної напруженості магнітного поля донора. В цих кореляціях відображаються ефекти зіткнень газових потоків з диском. Наприклад, оригінальний червоний пік емісії, спостережений у фазі 0.57P зі зміщенням  $V_r=200$  км/с в лінії  $SiY\lambda 1402$  та  $V_r=350$  км/с в лінії  $SP\lambda 1175$ , теж може бути відображенням у спектрі потоку газу, спрямованого магнітним полем донора від спостерігача в напрямі диску акретора.

Звернемо ще увагу на кореляцію залежності магнітного поля донора із орбітальною фазою  $H_e=f(P)$  з такими залежностями променевих швидкостей  $V_r=f(P)$  у поведінці складових профілю лінії  $SP\lambda 1175$ . Ця лінія сформована за лайманівською границею, де крива блиска в загальні втрачає ознаки подвійної системи (рис. 2), сягаючи максимуму випромінювання у фазах 0.6-0.8P другої квадратури [8, 9]. На рис. 7 зведено в один рисунок дані залежностей  $V_r=f(P)$  для двох складових емісійно-абсорбційної лінії  $SP\lambda 1175$  із статті [56].

Залежності  $V_r=f(P)$  для обох емісійних піків ведуть себе синхронно із кривою змінності  $H_e=f(P)$ . Відмітимо деякі конкретні динамічні аспекти їх поведінки з орбітальною фазою. Екстремуми кривих  $V_r=f(P)$  практично співпадають з фазами 0.35P та 0.85P, відображаючи напрям осі диполя магнітного поля донора. Подібна поведінка кривої  $\Delta V_r=f(P)$ , де  $\Delta V_r$  – різниця між променевими швидкостями довгохвильового та короткохвильового піків, що зростає від 750 км/с у фазах у околі 0.35P до 920 км/с у фазі 0.85P. Дуже чіткою є кореляція залежностей  $\Delta V_r=f(P)$  і  $H_e=f(P)$  для короткохвильового емісійного піка, променева швидкість якого у фазах поміж 0.35P та 0.85P зростає від -400 до -700 км/с, тобто різниця, що спостерігається у від'ємних швидкостях короткохвильового піка, зростає на  $\Delta V_r=300$  км/с. Подібну кореляцію з кривою змінності магнітного поля  $H_e=f(P)$  відслідковує своїми екстремумами на залежності  $V_r=f(P)$  довгохвильовий емісійний пік лінії  $SP\lambda 1175$ , але з меншою різницею  $\Delta V_r=120$  км/с між променевими швидкостями в фазах обох полюсів. Характеризуючи втрату речовини у швидкісному вітрі у всіх напрямках від подвійної системи, така поведінка є свідченням того, що у лінії  $SP\lambda 1175$  іонізована плазма виділяє напрям 0.35-0.85P осі диполя магнітного поля

донора, досягаючи найбільших швидкостей витoku поза межі подвійної системи саме у фазі 0.85P, тобто в напрямі спостереження на полюс магнітного поля донора, який наближений до акретора.



**Рис. 7.** Зміна з орбітальною фазою променевих швидкостей червоних (вгорі) та фіолетових (внизу) піків емісії лінії СШ $\lambda$ 1175 згідно даних статті [56]. Кореляцію їх змінності з кривою змінності магнітного поля відмічено фазами полюсів дипольного магнітного поля донора "H" (вісь 0.35P-0.85P; див. теж рис.3).

Аналогічну динаміку з орбітальною фазою демонструє абсорбція лінії СШ $\lambda$ 1175. У фазах спостереження полюса донора навколо 0.35P у першій квадратурі вона виявляє найменшу швидкість витoku газу  $V_r = -150$  км/с, але все ж значно більшою за параболічну. Така ж швидкість розширення притаманна багатьом абсорбційним лініям іонізованих елементів ультрафіолетового діапазону, включаючи MgII $\lambda$ 2795,2802 та SiIV $\lambda$ 1402, але залишається в них практично незмінною з орбітальною фазою. В той же час, абсорбційна лінія СШ  $\lambda$  1175 демонструє подвійне зростання швидкості витoku речовини поза межі системи до -300 км/с у фазах 0.7-1.0P, зцентрованих до фази 0.85P магнітного полюса донора у другій квадратурі. Будучи втричі більшою за швидкість А-абсорбції в лінії  $H_{\alpha}$ , абсорбційна лінія СШ  $\lambda$  1175 демонструє пришвидшений рух високоіонізованої плазми у магнітному полі.

Поряд з динамічними змінами слід розглянути і варіації інтенсивності або енергопереносу з орбітальною фазою для основних складових ліній СШ $\lambda$ 1175 згідно даних тієї ж статті [56]. Для кривої зміни з фазою інтенсивності довгохвильового емісійного піку  $I=f(P)$  прослідковується чітка кореляція із залежністю  $V_r=f(P)$  для цього піку. Таким чином, ці обі криві прямо корелюють із екстремумами залежності  $H_e=f(P)$ . Однак інтен-

сивність короткохвильового емісійного піку, досягаючи максимуму в першій квадратурі поблизу фаз магнітного полюса на донорі і відносно ослаблюючись у другій квадратурі, явно зменшена в напрямі лінії центрів зір-компонентів. Поведінка її з орбітальною фазою свідчить про те, що формування цього піку відбувається в просторі поміж компонентами з такою концентрацією цієї складової емітуючого газу, що, не затемнюючись, видима в першій квадратурі. Оптимальним виглядає картина, коли емітуючий газ тут знаходиться над площиною орбіти (вірогідно, це пояснюється нахилом осі диполя магнітного поля донора до площини орбіти, що оцінюється біля 30 градусів [31]).

Поведінка з орбітальною фазою інтенсивності  $I=f(P)$  абсорбційної складової лінії СШ $\lambda$ 1175, на перший погляд, незвична. Дійсно, при явно вираженій кореляції обох залежностей  $V_r=f(P)$  із  $H_e=f(P)$  крива інтенсивності  $I=f(P)$  цієї абсорбції демонструє оригінальну зміну вздовж орбітальної фази. Підказку для її розуміння дають самі автори статті [56], описуючи в першій квадратурі абсорбцію цієї лінії як вузьку і добре вимірювану, а в межах фаз другої квадратури як широку і неглибоку. І далі дослівно: «розширення СШ $\lambda$ 1175 в другій квадратурі може завдячувати турбуленції, продукованій зіткненням газових струменів, направлених від донора до акретора, з диском, який рухається в зустрічному напрямі». Ця догадка, мов би передбачаючи відкриття магнітного поля донора [20, 31], цілком укладається в нашу інтерпретацію поведінки абсорбції лінії СШ $\lambda$ 1175, як лінії, що відображає рух іонізованого газу, каналізованого магнітним полем донора до акреційного диску. Можна доповнити сказане й трактуванням динамічних процесів, відображених в абсорбції цієї ж лінії СШ $\lambda$ 1175, як газових потоків, які прискорені до -300 км/с в напрямках широкого інтервалу орбітальних фаз 0.65-0.05P, тобто центрованих до фази 0.85P саме того полюса магнітного поля донора, який наближений до масивного акретора. Підтверджується картина, в якій іонізована плазма, що направлена вздовж силових ліній магнітного поля донора в фазах довкола 0.85P, відхиляється в сторону акретора, ущільнюючись саме у фазах головного затемнення. Абсорбція лінії СШ $\lambda$ 1175 у цих орбітальних фазах явно відображає ефекти каналізації та переносу іонізованого газу вздовж силових ліній магнітного поля від донора до акретора. Поведінка цієї абсорбції нагадує поведінку А-абсорбції в лініях нейтрального водню та гелію, однак швидкості іонізованої плазми, відображеної лінією СШ $\lambda$ 1175, значно вищі за параболічну, формуючи швидкісний плазмовий вітер до акреційного диску та понад диском. Зростання інтенсивності абсорбції лінії СШ $\lambda$ 1175 у фазах поблизу головного затемнення акретором донора [56] може пояснюватися тільки збільшенням поглинання іонізованих газових потоків при їх проекції на донор.

### Прикінцеві узагальнення

Розглянуті приклади є далеко неповні, але цілком достатні, щоб мати уяву про явище у системі  $\beta$  Ліри, яке можна охарактеризувати як феномен енергомасопереносу вздовж силових ліній магнітного поля донора. Специфіка його конфігурації характерна тим, що вісь диполя магнітного поля направлена вздовж орбі-

тальних фаз 0.35-0.85P, нахилена до площини орбіти на кут біля 30 градусів, а центр магнітного диполя зміщений від гравітаційного центру донора в напрямі до масивного акретора на 0.08 відстані поміж центром донора та центром мас подвійної системи [31]. Відображаючи магнітосферу, сформовану вздовж осі магнітного поля, важливішою в енергомасопереносі є область полюса магнітного поля на поверхні донора, яка зцентрована до фази 0.85P другої квадратури і суттєво наближена до акретора (рис. 1, 5). У цій просторовій структурі магнітного поля донора стає зрозумілою поведінка кривих блиску  $\beta$  Ліри перед і, особливо, за лайманівською границею (рис. 2). Високоіонізована гаряча плазма, що каналізована вздовж силових ліній магнітного поля, є як джерелом нагріву областей акреційного диску, звернених до донора [4], так і самонагріву плазми в результаті зіткнень газу, прискореного магнітним полем донора і гравітаційним полем акретора. Саме при зіткненнях розігнаного газу, що направлений у фазах 0.45-0.65P практично перпендикулярно до обертового диску (рис. 1, 5), виникають потужні турбулентні завихрення та збурення розігрітого газу. При цьому, поперше, утворюється достатньо гарячої плазми, яка суттєвіше затемнюється більшим за розмірами донором у фазах поблизу 0.5P, ніж акретором у фазах поблизу 0.0P, що проявляється кроссовером у глибинах обох мінімумів перед лайманівською границею. По-друге, формується хмара нестационарної гарячої плазми, яка проявляється значним підвищенням інтенсивності випромінювання як на квазістационарній кривій блиску за лайманівською границею у фазах 0.55-0.8P другої квадратури (див. рис.2), так і у широкому максимумі абсолютного потоку випромінювання в лінії  $H_{\alpha}$  поміж фазами 0.6-0.1P (див. рис. 3), зцентрованих до фази 0.85P магнітного полюса на поверхні донора [46]. Такі ударні зіткнення змінюються на часах різної тривалості, відображаючись суттєво як у кривих блиску за лайманівською границею при спостереженнях у двох послідовних орбітальних циклах [8, 9], так і на інтервалах секунди-хвилини за даними швидкісної спектроскопії  $\beta$  Ліри [53]. По-третє, зіткненням високоіонізованої плазми з диском, розігнаною магнітним полем донора і гравітаційним полем акретора, можна пояснити активно пропаговану гіпотезу про існування в системі  $\beta$  Ліри джетів, тобто перпендикулярних до орбіти газових струменів, утворених у місцях ударних зіткнень газу з диском [1, 2]. Не виключаючи утворення джетів, можна вважати, що основний вклад у формування квазістационарної гарячої розсіюючої оболонки понад диском та навколо системи  $\beta$  Ліри (що проявляється, зокрема, у м'якому рентгенівському діапазоні [11]) вносить зоряний вітер зі швидкостями значно більшими за параболічні, особливо в діапазоні спектру за лайманівською границею. Інтенсивний вітер огортає всю систему, відображаючи напрями газових струменів, що півколом охоплюють акретор, як відхилених коріолісовими силами, так і каналізованих вздовж осі магнітного поля донора (що теж відхилена від площини орбіти на значний кут), а також ймовірно відображаючи загальну магнітосферу в системі  $\beta$  Ліри, утворену магнітозчепленням полів донора і акретора.

Більше того, явище енергомасопереносу, продуковане при допомозі магнітного поля, дає узгоджену кар-

тину динаміки та енергетики зіткнення газових потоків з акреційним диском у всіх хвильових діапазонах уздовж орбітальної фази. Розставимо деякі акценти в розумінні цієї узагальненої картини. Почнемо зі спостережень у фазах головного затемнення ( $1.0 \pm 0.1$ )P (беручи для ілюстрації рис. 1, 5 і обходячи його проти годинникової стрілки). У цих фазах обертання країв акреційного диску, що реєструється за допомогою ліній-сателітів зі швидкостями в середньому  $\pm 250$  км/с, спостерігається направленим в сторону спостерігача, а після центру затемнення - від нього. Газові потоки, що сформовані у другій квадратурі магнітним полем донора та гравітаційним полем масивного акретора і розігрівають поверхню диску та акретора, в центрі головного затемнення тим же акретором значно затінені. Водночас у всіх фазах цього затемнення ( $1.0 \pm 0.1$ )P потоки газу проявляються зі швидкостями, направленими на спостерігача, через зростання поглинання (типу А-абсорбції) в емісійно-абсорбційних лініях при їх проекції на донор і над площиною орбіти. Характеризуючи втрату речовини у швидкісному вітрі у всіх напрямках іонізована плазма виділяє напрям 0.35-0.85P осі диполя магнітного поля донора, досягаючи найбільших швидкостей витоків поза межі системи до -700 км/с саме у фазах довкола 0.85P, тобто в напрямі спостереження на полюс магнітного поля донора, який наближений до акретора. Стартуючи з поверхні донора в цих фазах, каналізований магнітним полем газ відхиляється до акретора та співударяється зі зовнішніми краями по всій півдузі обертового акреційного диску, але дівіше у межах спостережень у фазах 0.7-0.9P другої квадратури через енергетичний ефект від зустрічного руху речовини диску і падаючих на нього газових потоків. Такий обігрів диску проявляється як широка гаряча пляма, що і зафіксовано у моделюваннях V-кривої блиску  $\beta$  Ліри, центрованої до фаз в околі 0.80P [4], та значним зростом абсолютного потоку випромінювання в лінії  $H_{\alpha}$  [46]. Газові потоки ефективніше розганяються магнітним полем донора, а потім гравітацією акретора всередині порожнини Роша акретора в межах фаз 0.45-0.60P, вдаряючись в обертову поверхню диску практично перпендикулярно до його зовнішніх країв. Максимальний енергетичний ефект тут проявляється за лайманівською границею, де турбулентно збурена високоіонізована плазма (що практично закрита донором у фазах 0.45-0.55P) формує на кривій блиску локальне підвищення інтенсивності випромінювання у фазах 0.55-0.8P. У фазах 0.3-0.45P рух газу від донора вже частково співпадає з напрямом руху зовнішніх країв акреційного диску. Тут на потік газу діє комбінація коріолісових сил, гравітації акретора та магнітного поля донора, що ущільнює потік газу, підтискаючи акреційний диск до акретора. Це відображається у променевих швидкостях ліній-сателітів, що, формуючись у зовнішніх краях диску, досягають максимальної швидкості -270 км/с. Водночас сумарна дія цих сил приводить в фазах 0.35-0.50P до видимого розігріву поверхні диску та турбулентних завихрень гарячої плазми, що чітко фіксуються як локальне зростання абсолютного потоку випромінювання в лінії  $H_{\alpha}$  [46], локальне зменшення поляризації [52], та як проявлення гарячої області на акреційному диску при моделюванні V-кривої блиску  $\beta$  Ліри [4]. В межах широкого інтервалу фаз 0.4-

0.8Р проявляються енергетичні ефекти, які можна трактувати як джети, що виникають у результаті ударних зіткнень плазми з диском, стимульованих магнітним полем та гравітацією акретора. Не виключено, що джети формуються і при зіткненні гарячої плазми в районі полюсів магнітного поля як на донорі, так і на акреторі.

Таким чином, на підставі пропонованих досліджень можна стверджувати: енергомасоперенос в загальній картині руху газових потоків  $\beta$  Ліри відображає просторову структуру магнітного поля донора. Фізично значимою є вісь дипольного поля донора, що відхилена відносно гравітаційної осі центрів зір-компонентів. Такі особливості структури магнітного поля донора уможливають процес переносу замагніченої речовини у фазах другої квадратури поряд з переносом у фазах першої квадратури, обу-

мовленим в основному стандартною гідродинамічною картиною. Узгоджена дія сил, задіяних у цих процесах, створює оригінальну віялоподібну картину масопереносу, що зі сторін обох квадратів огортає акретор. В результаті високоенергетичних зіткнень іонізованої плазми з акреційним диском, каналізованих магнітним полем донора, формується загальна розсіююча оболонка, що частково маскує зорі-компоненти за лайманівською границею та повністю в м'якому рентгені. Ці ефекти можуть бути підсилені взаємодією магнітних полів донора та акретора. Більше того, можна висунути гіпотезу про те, що на даному етапі еволюції системи  $\beta$  Ліри в результаті активного руху розвинених навколосоряних газових структур йде формування магнітних полів зір-компонентів та акреційного диску з утворенням загальної магнітосфери цієї взаємодіючої подвійної системи.

#### REFERENCES

- [1] Harmanec P., Morand F., et al. 1996, *Astron. and Astrophys.* 312, P. 879
- [2] Harmanec P. 2002, *Astron. Nachr.* 323, P. 87
- [3] Ak H., Chadima P., et al. 2007, *Astron. and Astrophys.* 463, P. 233
- [4] Mennickent R.E., Djurasevic G. 2013, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 432 (I.1), P.799
- [5] Goodricke J. 1783, *Phil. Trans. Roy. Soc.* 73, P. 482
- [6] Huang Su-Shu 1963, *Astrophys. J.*, 138, P. 342
- [7] Linnell A.P. 2000, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 319, P. 255
- [8] Polidan R.S. 1989, *Space Science Reviews* 50, P. 85
- [9] Kondo Y., McCluskey G.E., et al. 1994, *Astrophys. J.* 421, P.787
- [10] Zeilik M., Heckert P., et al. 1982, *Astron. J.* 87 (9), P.1304
- [11] Ignace R., Oskinova L. M., et al. 2008, *Astron. and Astrophys.* 463 (3), L37
- [12] Burnashev, V.I., Skulsky M.Yu. 1978, *Bull. of the Crimean Astrophys. Obs.* 58, P.64
- [13] Van Hamme W., Wilson R.E. and Guinan E.F. 1995, *Astron. J.* 110, P.1350
- [14] Skulsky M.Yu. 2001, *Odessa astron. Publ.* 14, P.227
- [15] Struve O. 1934, *Observatory* 57, P.268
- [16] Struve O. 1941, *Astrophys. J.* 93, P.104
- [17] Skulsky M.Yu. 1973, *Astron. circular* №766, P.4
- [18] Skulsky M.Yu., Malkov Yu.F. 1992, *Astron. J.* 69, P.291
- [19] Hirnyak M.B., Skulsky M.Yu. et al. 1978, *Bull. of the Crimean Astrophys. Obs.* 58, P.75
- [20] Skulsky M.Yu. 1982, *Letters to AJ* 8, P.238
- [21] Skulsky M.Yu. 1993, *Letters to AJ* 19, P.116
- [22] Crawford Z.A. 1955, *Astrophys. J.* 121, P.71
- [23] Skulsky M.Yu. 1975, *Astron. J.* 52, P.510
- [24] Skulsky M.Yu., Topilskaya H.P. 1991, *Letters to AJ* 17, P.619
- [25] Skulsky M.Yu. 1992, *Letters to AJ* 18, P.711
- [26] Zhao M., Gies D., et al. 2008, *Astrophys. J.* 684 (2), L95
- [27] Skulsky M.Yu. 1975, *Problems of Space Physics. Bulletin of Kiev. Univ.* 10, P.160
- [28] Skulskij M.Yu. 1986, *Colloquim IAU N90 "Upper main sequence stars with anomalous abundances"*, Eds. Cowley et al. *Utrecht Reidel publ. comp.* P.365
- [29] Balachandran S., Lambert D.L., Tomkin J. 1986, *MNRAS* 219, P.479
- [30] Skulsky M.Yu. 1993, *Letters to AJ* 19, P.45
- [31] Skulsky M.Yu. 1985, *Letters to AJ* 11, P.51
- [32] Skulskij M.Yu. 1990, *Mitteilungen KSO Tautenburg* N125, P.146
- [33] Piskunov N.E., Khokhlova V.L. 1983, *Letters to AJ* 9, P.665.
- [34] Skulsky M.Yu. 1985, *Bull. of the Abastum. Astrophys. Obs.* 58, P.53
- [35] Burnashev V.I., Skulsky M.Yu. 1986, *Letters to AJ* 12, P.535
- [36] Skulsky M.Yu., Plachinda S.I. 1993, *Letters to AJ* 19, P.517
- [37] Skulsky M.Yu., Plachinda S.I. 2005, *Proc. IAU Symp. N224 "The A-Star Puzzle"*. Eds Zverko J., Ziznovsky J., et al., Cambridge Univ. Press. P. 647
- [38] Skulsky M.Yu., Plachinda S.I. 2008, *Bull. of the Crimean Astrophys. Obs.* 104, P.212
- [39] Leone F., Plachinda S.I, et al. 2003, *Astron. Astrophys.* 405, P.223
- [40] Chountonov G.A. 2000, *Proc. Intern. Conf. "Magnetic fields of chemically peculiar and related stars"*, Eds. Glagolevskij Yu.V., Romanyuk I.I. Moskow, P.94
- [41] Skulsky M.Yu. 1974, *Astron. circular* №827, P.3
- [42] Skulsky M.Yu. 1993, *Letters to AJ* 19, P.417
- [43] Sahade J., Huang S.S., et al., 1959, *Trans. Amer. Philos. Soc.* 49, P. 1
- [44] Sahade J. 1980, *Space Science Reviews* 26, P.349
- [45] Burnashev V.I., Sculsky M.Yu. 1980, *Letters to AJ* 6, P.587
- [46] Burnashev V.I., Sculsky M.Yu. 1991, *Bull. of the Crimean Astrophys. Obs.* 83, P.108
- [47] Paczynski B. 1977, *Astrophys. J.* 216, P.822
- [48] Osaki Y. 1985, *Astron. and Astrophys.* 144, P.369
- [49] Peel M. 1997, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 284, P.148
- [50] Kosovichev A.G., Skulsky M.Yu. 1990, *Letters to AJ* 16, P.240
- [51] Skulsky M.Yu., Plachinda S.I. 2008, *Bull. of the Crimean Astrophys. Obs.* 104, P.212
- [52] J.R. Lomax, J.L. Hoffman, et al., 2012, *Astrophys. J.* 750 (I.1), P.13
- [53] Alexeev G.N., Skulsky M.Yu. 1989, *Astrophys. research* 28, P.21
- [54] Batten A.H., Sahade J., 1973, *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 85, P.599
- [55] Sokolov I.I., Chentsov E.L. 1984, *Astrophys. research* 18, P.8
- [56] Hack M., Hutchings J.B., et al., 1977, *Astrophys. J., Suppl. Ser.* 34, P.565
- [57] Skulskij M.Yu. 1992, *Proc. Intern. Conf. "Stellar magnetism"*, Eds. Glagolevskij Yu.V., Romanyuk I.I. "Nauka", St-Peterburg, P.127

**On the nature of the interacting  $\beta$  Lyrae system: localization of hot regions on the accretion disk as a representation of magnetized gas structures**

**M. Yu. Skulsky**

**Abstract.** This investigation was caused by the publications of the results of the self-consistent simulations of the light curves of the well-known massive close binary system  $\beta$  Lyrae. The one major among them is the statement of the significant contribution of the accretion disk radiation in the light curve of the system. In particular, there were identified two hot regions with temperatures that are 10% and 20% higher than the average on the disk rim. It is assumed that these shock regions might be formed by gas flows in regions of collisions on the disk in the mass transfer between components.

Indeed, the hotter region of the rim disk at the phase 0.40P is explained naturally by the Coriolis force deflection of the main gas flow that is directed from a donor through a Lagrange point to the accretor's Roche lobe and with a further collision of this flow with the disk. However, this explanation can not be suitable to a wide hot region of the disk rim that is observed at the phase 0.80P. Our analysis of absolute spectrophotometry, of curves change of magnetic field, of radial velocities and intensities of spectral lines along the orbital phases indicates that the hot region on disk at phases near 0.80P has a special nature. The donor's magnetic field should be taken into account because at these phases its dipole axis is actually aimed to the observer and deflected towards disk of the accretor. This hot region on the disk can be formed by the collision with this disk of magnetized gas which is canalized by the donor magnetic field in a certain way oriented in space. The energy effect of the collision on the disc is significantly strengthened by the counter rotation of the outer edges disc towards the falling gas flows. The structure of the donor's magnetic field is effective at heating and the hotter region on the disk rim at phases near 0.40P. The specific configuration of the magnetic field of the donor explains why at rotation of the donor and the accretor around their common center of masses on line of sight of the observer these two hotter regions dominate on the accretion disk.

The main conclusion is that the mass transfer, the formation of circumstellar gas structures, their dynamics and energetics are regulated by magnetic field of the donor. Probably in the interaction of magnetic fields that were generated on the donor and accretor with its disk there is a solution to the problem of the real existence and the physical nature of jet-like structures in the  $\beta$  Lyrae system.

**Keywords:**  $\beta$  Lyr, magnetic field, accretion disk, mass transfer

## Specific character of the atomic structure of the disordered condensed state

E.I. Borkach\*<sup>1</sup>, G.M. Ivanitska<sup>2</sup>, V.S. Kovtunenکو<sup>3</sup>

<sup>1</sup> II Rákóczi Ferenc Transcarpathian Hungarian Institute, 6 Kossuth Square, Berehove, 90202, Ukraine

<sup>2</sup> Uzhgorod National University, 32 Voloshin str., Uzhgorod, 88000, Ukraine

<sup>3</sup> Cherkasy State Technological University, 460 Shevchenko Blvd., Cherkasy, 18006, Ukraine

\*Corresponding author. E-mail: barkatsj@gmail.com

Paper received 02.05.15; Revised 11.05.15; Accepted for publication 16.05.15.

**Abstract.** It is grounded physical meaning of short-range order of amorphous materials based on its differences from the short-range order of crystals. Thus, the amorphous substance is the solid body with the correlation (probabilistic) topological short range order in the structural particle locations that excludes formation of long range order. And, respectively, the crystal is the solid body with the total functional order in the atomic locations that ensures realization of both short and long range orders. We shall especially emphasize that in order to understand the differences in the structure of the crystals and the amorphous solids one has to point out the physical and chemical parameters of short range order of the separate atoms and the whole substance. In crystals, all the atoms that occupy the similar positions in the crystalline lattice have completely identical short range order. In the amorphous substances the following averaged parameters of SRO are considered: the general character of interaction between the nearest neighbors; averaged geometric figures of mutual location of the nearest neighbors; average angles between the chemical bonds; types of the bonds and their average energies; the character of the distribution of the bonds over different types; the equilibrium average coordination spheres radius; the average coordination numbers; the dimensions of the coherent scattering regions. The statistical distribution of these short range order parameters even for the equivalent atoms of the atom network defines the differences of all the properties of the amorphous and crystalline solids.

**Keywords:** *amorphous materials, atomic structure, short range order, long range order*

The analysis of the atomic structure of any real solid-body system requires clear pointing out the ideal basic atomic network and its defects. Similarly to the crystals, this includes the introduction of the notion of the ideal amorphous substances. Considering the ideal systems, we suggested the amorphous systems of a certain chemical composition, in the disordered atomic network of which each atom realized all its chemical bonds. In this work, we shall analyse the specific features of the atomic structure of the ideal amorphous substances.

The description of the structure of the atomic network of the substance includes the transition to the scaling level comparable with the dimensions of the separate atoms. On this scaling level, the corresponding coordinate frame is introduced being related to the object space. The coordinates of atoms and the other structural elements are set with respect to this frame.

The general idea about the atomic structure of the substance is as follows. Consider a certain volume  $V$ , which contains, at fixed temperature  $T$ ,  $N$  atoms of different  $m$  chemical elements bound by the chemical bonds, which demonstrate the thermal oscillations around the equilibrium position. The momentary position of each atom in this volume is determined by its coordinates or by the radius-vector  $\vec{r}_k$  (for the  $k$ -th atom) drawn to this atom from the origin of the coordinate frame. Thus, one may choose as the general characteristic of the whole sample the  $3N$ -dimensional vector  $\vec{R}$ , the coordinates of which are the relevant spatial coordinates of all atoms of the system.

In the amorphous substances, like the crystals, the local spatial configurations with correlated 'correct' location of the closest neighbors are realized [1-3]. Short range order (SRO) corresponds to the certain regularity in the locations of interatomic distances and the valence angles between the nearest atoms and describes the consistency in the atomic locations on the distances of several interatomic distances [4]. And the atomic network SRO defines primarily the

basic physical properties of the amorphous substances [5, 6]. It should be noted that the most of researchers do not impose limitations on SRO [7], but only state the availability of certain SRO in the amorphous solids, not itemizing its peculiarities [4, 8]. In general, in the condensed systems in the region of SRO the structures with both Fedorov's and non-Fedorov's symmetry groups are realized [9].

When defining the atomic structure of the amorphous substances it is necessary not only to state that these systems have SRO. One has to provide this attribute with a strict physical sense. The key moment here is the difference between SRO in the amorphous substances and that in the crystals. Indeed, both the amorphous substances and the crystals have SRO. If one assumes that these short-range orders are the same, then it is not evident why at the SRO extension Long range order (LRO) arises in the crystals and does not arise in the amorphous substances. The reason for such behaviour is that SRO in the crystals and in the amorphous substances is essentially different. As mentioned in the previous section, SRO in crystals is defined by a strict functional dependence of the structural particle locations in the space (functional SRO), while SRO in the amorphous substances – only by the correlation dependence of structural particles locations (correlation or probabilistic SRO). The functional SRO at its 'extension' in the space 'automatically' provides the formation of the atomic network with LRO having properties typical for the crystals. The same 'extension' of correlation SRO results in the loss of ordering in the structural particle locations at the certain distances inherent in the amorphous substances. Thus, SRO of the substance is decisive, and the character of this SRO provides the possibility of the existence or lack of the system LRO.

In this context, the amorphous substance is the solid body with the correlation (probabilistic) topological LRO in the structural particle locations that excludes formation of SRO. And, respectively, the crystal is the solid body

with the total functional order in the atomic locations that ensures realization of both SRO and LRO (or translation periodicity) in the atomic locations.

Taking into account the above definitions, we can classify a great number of 'exotic' materials as the amorphous substances. The examples are the soft Alexander's phases [10] in a form of the molecular glasses, jells, pastes, concentrated emulsions, concentrated colloids, foams [11] and the athermic amorphous systems in a form of the granulated substances [12, 13].

Thus, SRO in the amorphous substances is due to the local correlations of the certain physical quantities  $P(\vec{r})$  of their atomic network. Mathematically, to describe the local correlations of given physical quantity  $P(\vec{r})$  for the discrete atomic network, the first spatial correlation function is used

$$\Phi(\vec{x}) = \overline{P(\vec{r})P(\vec{r} + \vec{x})} \quad (1)$$

where  $\vec{x}$  is the spatial variable [14]. Correlations of the physical quantity  $P(\vec{r})$  in the system exist, if the introduced first correlation function is significantly non-zero in the certain local spatial interval  $|\vec{x}| \leq L$ . At  $|\vec{x}| > L$  the correlations in the systems become not essential [14].  $L$  is called the correlation length or the radius. It serves the spatial scale of the available correlations of the physical parameters of the substance and, respectively, characterizes the degree of its ordering. When studying SRO, the radius-vectors are the basic physical parameters, which specify the locations of the atoms in the space in the certain coordinate frame. In other words, when speaking about SRO the atomic network structure is meant only, i.e., in average similar topologies of the location of atoms around the arbitrarily chosen centre in the region with the SRO correlation radius  $L$ .

Note that in the structural sense SRO is always fixed with respect to a certain atom called the central one (fig. 1). The quantum-mechanical interaction between this atom and its nearest neighbors with the formation of different-type chemical bonds is the primary cause and the drive force of the SRO appearance. This means that different-intensity interatomic correlations are established in the substances due to the action of the internal (structural particles interaction) and external (for example, pressure) forces.

Let us give several definitions to emphasize these SRO peculiarities. According to Ref. [2], SRO is a number of the nearest neighbors surrounding the atom chosen as the central one. The main SRO parameters here are the number of the neighbors (coordination numbers) and the distances between them (radii of the coordination spheres). The similar statements could be found also in Refs. [15, 16]: SRO means the correct location of a certain number of the nearest neighbors close to the fixed atom, ion or molecule. Or in Ref. [17]: in the covalent bound materials, SRO is characterized by the number  $Z_j$  of the nearest neighbors of the  $j$  type bound mainly by the covalent bonds with the length  $r_{ij}$  from the initial atom  $i$ . These parameters describe well-defined coordination polyhedron (e.g.,  $\text{Si}_4$ ), which is a basic structural unit and, in several cases, may produce the whole structure.

We shall especially emphasize that in order to understand the differences in the structure of the crystals and the amorphous solids one has to point out the physical and chemical parameters of SRO of the separate atoms and the whole substance.

For a single atom (black circle in fig. 1) SRO is described by: the character of its interaction with neighbors (e.g., the presence of two types of bonds); the geometric location of the nearest neighbors around it (in fig. 1, the nearest neighbors are located in the pyramid vertices); the type and the length of the chemical bonds between this atom and its neighbors (As-As bond with the  $l_1$  length and As-Se bonds with the  $l_2, l_3$  lengths in fig. 1); the angles between the chemical bonds (angles  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  in fig. 1); the binding energy ( $E(\text{As-As})$  and  $E(\text{As-Se})$  in fig. 1); the number of different-type neighbors (in fig. 1, the nearest neighbors are two Se atoms and one As atom) and so on.

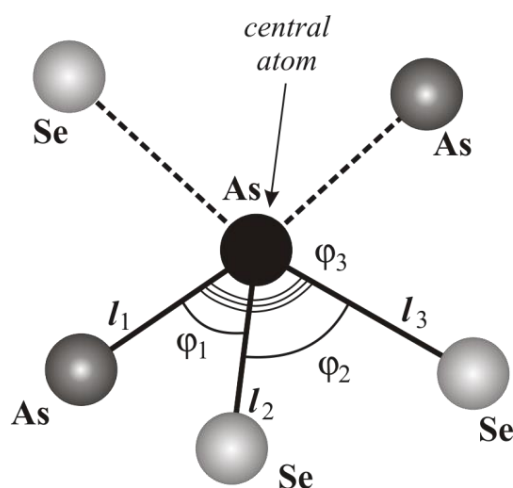


Fig. 1. SRO parameters of a single atom

- – dominantly covalent bonds;
- - - - - – Van-der-Vaals-type bonds

In crystals, all the atoms that occupy the similar positions in the crystalline lattice have completely identical SRO. Due to this, after the translation transfer of the central atom with its strictly fixed SRO, LRO arises in crystals. In the amorphous substances, the situation is changed drastically. Each separate atom in the amorphous substance also has its strictly determined SRO. Thus, a separate configuration of the close environment is related to each 'central' atom and the structure around each atom is individual and specifies the local atomic configuration (network) in its vicinity. Configurations of different closely located atoms are totally or partially overlapped.

However, different identical central atoms could have quite different SRO parameters. Due to this the agreement in the location of the neighbors decreases quite rapidly with the distance from the central atom and vanishes at the certain distances SRO around this central atom. Respectively, the possibility to form SRO also vanishes. Therefore, when describing the structure of the whole macrosample one has to carry out the statistical averaging of the above SRO parameters over the macroensemble of all the atoms of the sample, each of them being alternatively taken as the central one.

Such averaged parameters around the 'average' central atom describe the correlation SRO of the whole amorphous substance. The following parameters are considered the main averaged parameters of SRO: the general character of interaction between the nearest neighbors



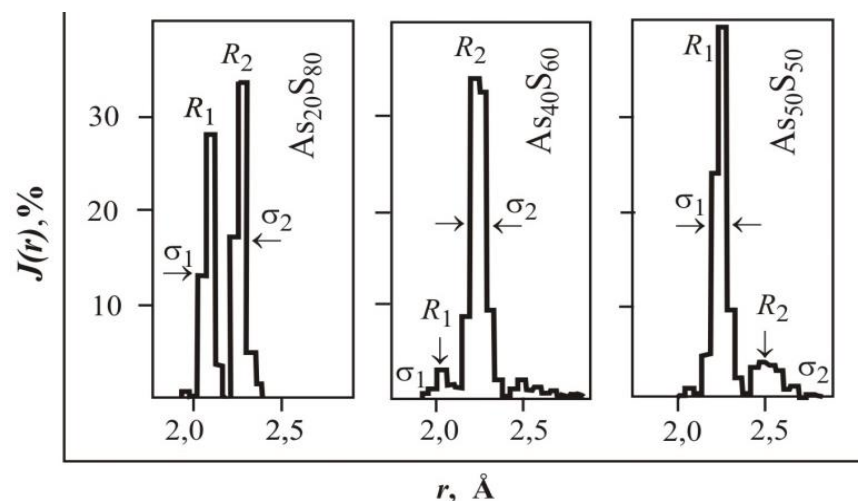
(e.g., relation between the covalent, ionic and other types of the chemical bonds); averaged geometric figures of mutual location of the nearest neighbors; average angles between the chemical bonds  $\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2, \bar{\varphi}_3, \dots$ ; types of the bonds and their average energies (for example,  $\bar{E}$  (As-Se),  $\bar{E}$  (As-As)...); the character of the distribution of the bonds over different types (e.g., 10% of the As-As, 70% – As-Se and 20% – Se-Se bonds); the equilibrium average coordination distances (coordination spheres radii  $R_1, R_2, \dots$ ); the average coordination numbers (CN –  $Z_1, Z_2, \dots$ ); the dimensions of the coherent scattering regions (i.e. the average distance  $L$ , at which the correlation in the nearest neighbors locations vanishes).

The above averaging results in the appearance of the statistical distributions of the physical and chemical parameters of the system. Therefore the basic parameters of SRO in the amorphous substances (being rigorously defined) must be presented in a form of such distributions. A number of the values that characterize the relevant statistical distributions are added here to the averaged parameters: the mean-square deviations (dispersion) of interatomic distances  $\sigma_1, \sigma_2, \dots$  (fig. 2); the dispersion of the angles between the chemical bonds  $\sigma_{\varphi_1}, \sigma_{\varphi_2}, \dots$  (fig. 3); the CN distribution dispersion  $\sigma_{Z_1}, \sigma_{Z_2}, \dots$  (fig. 4); the chemical bond statistics and its changes with varying synthesis conditions (fig. 5);

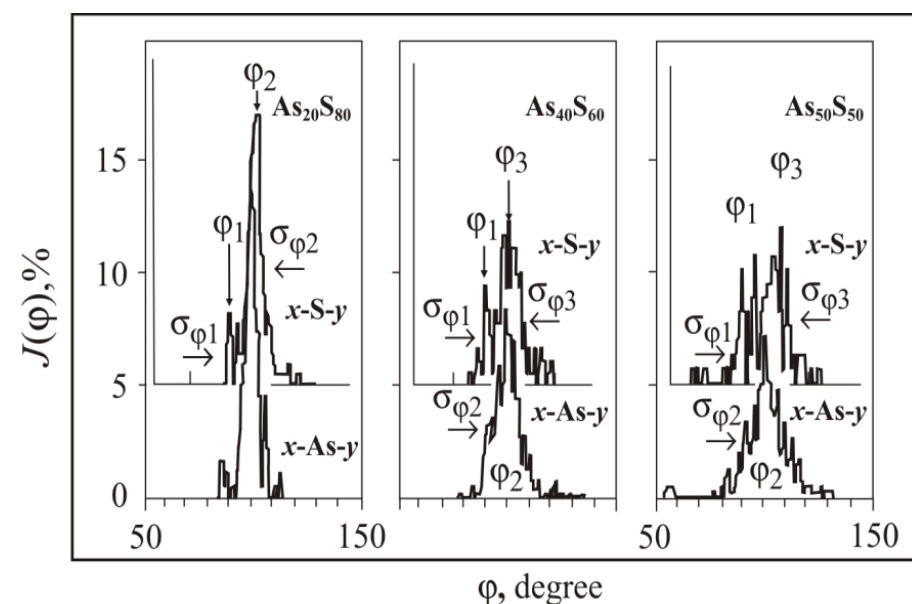
the number, the types and the statistics of the basic coordination geometric figures that describe SRO etc. The most of researchers assume that this statistical distribution of the SRO parameters even for the equivalent atoms of the atom network defines the differences of all the properties of the amorphous and crystalline solids [18].

Each of the above SRO parameters of the amorphous substances determines certain peculiarities of their structure [16]. For example, the atomic coordination and the relative energy of the chemical bonds determine the topology of the disordered atomic network. Inclusion of only the first parameter results in the model of the chemically ordered network. Competition and, to some extent, interaction of these factors determine the final result for the specific substance.

From the viewpoint of the method of studying the structure of the atomic network in the complex amorphous substances, the especially unpleasant result of averaging is 'overlapping' of quite different individual SRO of different atoms: e.g., the tetrahedral for the Ge and Si atoms; the pyramidal for the As, Sb and Bi atoms; the linear doubly-coordinated for the S, Se, Te atoms and others. The experimental distinguishing of the above particular contributions from the general structural pattern is quite complicated task.



**Fig. 2.** Distributions of the probability  $J(r)$  of realization of the chemical bonds between the nearest neighbors in the amorphous glasses  $As_{20}S_{80}$  (a),  $As_{40}S_{60}$  (b),  $As_{50}S_{50}$  (c) [19]



**Fig. 3.** Distributions of the probability  $J(\varphi)$  of realization of the angle  $\varphi$  between the different chemical bonds in the amorphous glasses  $As_{20}S_{80}$  (a),  $As_{40}S_{60}$  (b),  $As_{50}S_{50}$  (c) [19]. (Upper distributions – around the S atoms; lower – those around the As atoms; x and y can be either S or As atoms, respectively)

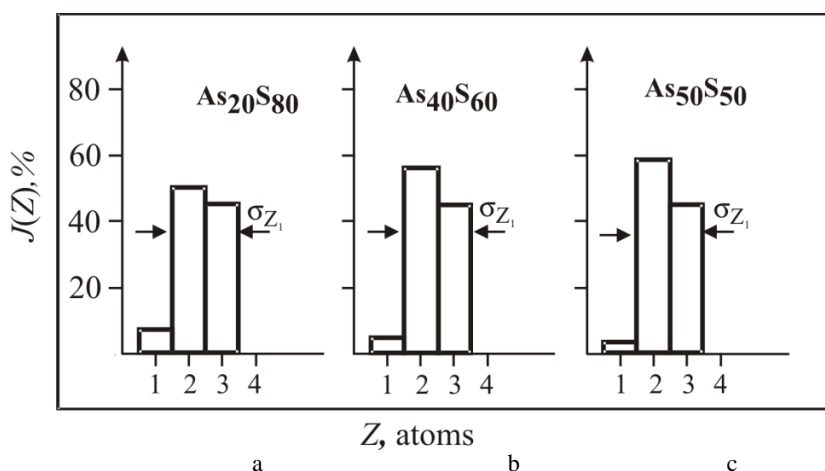


Fig. 4. Distributions of the coordination numbers of the first coordination sphere in the amorphous glasses As<sub>20</sub>S<sub>80</sub> (a), As<sub>40</sub>S<sub>60</sub> (b), As<sub>50</sub>S<sub>50</sub> (c) [19]

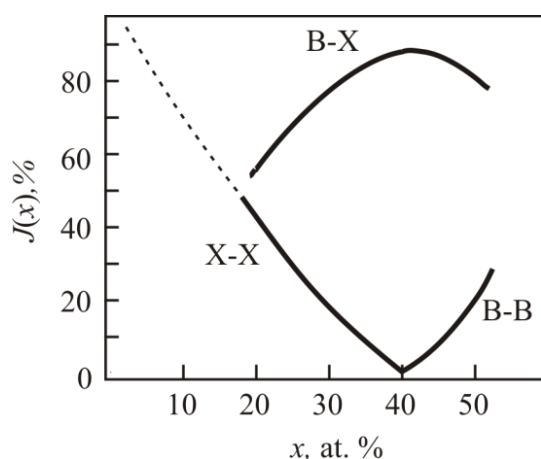


Fig. 5. Concentration dependence of the probability  $J(x)$  of realization of the different-type chemical bonds in the model of the total chemical order in the amorphous substances  $B_x^V X_{1-x}^{VI}$

By virtue of such peculiarities of SRO in the amorphous substances several local elements of the atomic network can be identical. However, it is impossible to 'eliminate' such identical and local areas by a certain set of translation operations. On the other hand, any limited macrovolume of the amorphous substance, which includes some hundreds of atoms, can be substituted by the same volume taken from the other part of the sample, not observing in this case a visible difference in the general structure and properties of this amorphous system. At the distances of such order the amorphous substance must be statistically homogeneous and one may use the continuous medium approximation to describe its structure at the above distances.

Depending on the physical parameters taken for consideration at the analysis of the structure of the amorphous substance, several types of its SRO are distinguished [2, 20]. The distant SRO specifies only the radii of the coordination spheres and the coordination numbers. The compositional (chemical, sorted) SRO describes the correlations in the mutual locations of different chemical elements. The topological (geometric or physical) SRO specifies the correlations of any parameter of the spatial location of the atoms and the chemical bonds between them. When considering this SRO one may not take into account the chemical nature of the elements. The orientation SRO is stipulated by the ordering of orientations of the structural particles, for example, it specifies correla-

tions in the orientation of several polymer fibres. Actually, the decisive is the chemical SRO, because the specific features of the atomic linkage and the parameters of this linkage are specified by the chemical nature of the atoms. The topological SRO is revealed as the result of formation of the chemical SRO and results from the chemical SRO in a form of certain geometric configurations and parameters of the atomic network.

The notion of the average or intermediate order is widely used in the analysis of the structure of the amorphous substances. This order is most often related to the existence of certain interatomic correlations or regularities in the mutual locations of the atoms at the distances exceeding the radii of the first two-three atomic coordination spheres. The existence of the first sharp diffraction peak (FSDP) in the neutron, electron and X-ray diffraction distribution is taken as the direct evidence of the occurrence of inermiduum range order (IRO) in a form of certain regions of the structural configuration ordering at the scaling level of about 1 nm. This peak is inherent in the overwhelming number of the amorphous substances, though, the exceptions are possible (say, the amorphous Si films). The experimental pieces of evidence indicate the affinity of many amorphous substances by the FSDP parameters: intensity, half-width and position of this peak vertex [5, 21-23].

The existence of SRO and IRO in the amorphous substances requires elucidation of the quantitative scale of their manifestation. To do this, it seems expedient to use the introduced above radii of the atomic correlations of the atomic network  $L$ . SRO is the lowest scaling level of ordering in the disordered system structure. If the value  $L$  is proportional to the interatomic distances, only SRO does exist in the substance. It expands in space for 1 to 5 interatomic distances and is localized in the spherical region with the correlation radius  $L$  up to 1 nm.

At the considerable excess of the correlation radius  $L$  over the interatomic distances one may speak about the occurrence of IRO in the substance. IRO overlaps partially the scaling level of SRO. It expands in the space for 3 to 10 interatomic distances and is localized in the region of about 1 nm size.

The other criteria of the quantitative limits of ordering of these scaling levels are also suggested. For example, when studying the charge carrier dynamics in the unordered media, the SRO and IRO scales can be found in accordance with the relation of the two characteristic lengths: the Coulomb potential screening radius in the

condensed system  $R_e$  and the size of the coherent scattering regions  $R_k$ . If  $R_k \leq R_e$ , it is assumed that only SRO exists, whereas at  $R_k \leq R_e$  both SRO and IRO occur.

When analysing SRO and IRO, the analysis of connectivity, dimensionality and other general topological characteristics of the atomic network is also important. There is an idea [24] that the differences in the structure of the amorphous and crystalline bodies are manifested only on the IRO level, while SRO in the most of the amorphous materials approximately corresponds to the crystalline SRO. Such conclusion was based on the analysis of the metal glasses only, and the presence of disclinations was considered to be its cause. Taking into account the above remarks on the specific character of SR in the amorphous substances, it seems probable that such a point of view is wrong, in particular, for the metal glasses.

The experimental studies of the structure-sensitive properties of the amorphous substances indicate their structural heterogeneity. This is related to the next scaling level of the atomic network structure called mesoscopic level, which is extended at the distances of several nanometres. In the diffractograms, this structural level is revealed, as a rule, in the region of the central peak, which covers the small-angle scattering and the part of the scattering intensity that rapidly descends to FSDP. It is assumed that for the mesoscopic level the correlation radius is  $L = 1 - 10$  nm. The mesoscopic level is connected with the formation of a distinct hierarchy of the structural heterogeneities in the amorphous substances [21]: the chemical composition non-uniformities; the coexistence of different SU; molecular structure of the group of atoms of the amorphous network; the irregular structural cavities and fluctuations of the atomic density; the rings of different-length interatomic distances; the multi-phase associates of the fine crystalline particles etc. [21, 25, 26]. The structural and chemical heterogeneity of the nanoscale should be accepted as an inherent characteristic of the atomic network of the amorphous medium estimating it as one of the fundamental aspects that reflect and determine the metastable structural state of almost any amorphous substance.

Probably, there exists a relation between the mesoscopic and intermediate ordering. The structural particles, which make a basis of IRO manifestation, may simultaneously be revealed on the mesoscopic level as well. At the same time, the mesoscopic effects reflect the manifestation of a considerably wider spectrum of different structural polyatomic fragments as compared with the IRO effects. Therefore, when studying the mesoscopic structure parameters one have to take into account its correlation character and, respectively, to use different statistical distributions. One of them, for instance, can be the statistical distribution of the atomic rings (fig. 6).

The scaling levels of the nanostructure and microstructure with characteristic dimensions exceeding ten nanometers are the highest ones for the amorphous substances. Here the transition occurs from the discrete ideal atomic network to the amorphous substance structure on the qualitatively new level – the ideal continuous matrix. One may also note here the revelations of the macroscale heterogeneities with characteristic dimensions of several microns (the substructural heterogeneity). The indirect influence of the above heterogeneity may also be reflected in the peculiarities of the structure and the properties of

the amorphous substances. In the crystals, LRO is the highest structural level, which defines ordering of their structure at the infinitely large distances.

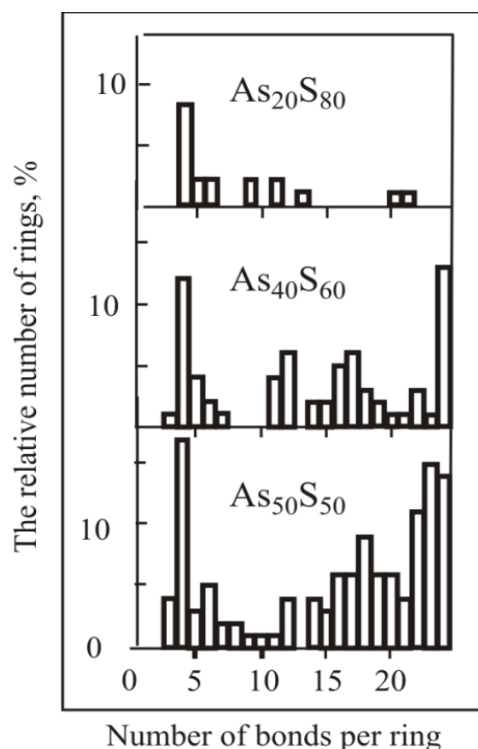


Fig. 6. Distributions of rings with different number of atoms in the As-S glasses [12]

In the process of physical and chemical analysis it is necessary to consider not only the chemical composition, structure and properties of the substance, but also to take into account its dispersibility [27]. At the crystal dispersion in the surface layers of the material the chemical bonds are broken and switched over, the angles between them are changed and new atomic configurations are distorted. Therefore, in the surface layers of the disperse particles LRO is broken, whereas the crystalline SRO is strongly distorted and in the boundary cases is completely destroyed. At some limiting size of the disperse particles all atoms become 'surface' atoms and their structure corresponds to the strongly distorted crystalline SRO. Since the SRO parameters distortion can be different, then SRO formed at the dispersion is called unlimitedly variational [27].

In accordance with such analysis, the conclusion is made [27] that the dispersibility is more determinant structural essence of the substance as compared with its SRO. In this case the dispersibility is considered the first cause of formation of a specific SRO of the amorphous films – the unlimited variational (twisted, surface-shell) SRO. In this relation, the dispersibility is also attributed the role of a forming factor of the amorphous non-glassy substances. As a result, V.S. Minaev gives the following definition of the latter: this is the ultramicrodisperse formation, the state of the substance of 'islets' (clots, monolite fragments, aggregates) with the dimensions varying from several units to tens angstrom, which accreted in spots with each other but on the large part of the surface are separated by the ultramicrohollows and are formed on the basis of unlimitedly variational SRO [27].

Supporting the idea of the necessity of taking into account the dispersibility when studying the properties of solids and its substantial influence on the peculiarities of their atomic structure, note that, probably, there are no sufficient grounds for its absolutization. Dispersibility is mainly the technological factor. It is the structure forming factor only indirectly, reflecting the conditions of their production in the peculiarities of the structure. Similarly, in the structure of the amorphous films, the technological conditions of their vacuum deposition are reflected.

It is also not reasonable to limit the amorphous state by the macrosystems of the 'ultramicrodisperse' formations, because the emphasis in such objects should be directed not to the parameters of the whole 'powder', but on the structure of some its disperse particles. Each of these particles is itself a particular subtype of the solid state. In turn, similarly to the case of the solid state, they can be either crystalline or amorphous. The fact that we construct of such particles the purely mechanical mixture (powder) makes no drastic changes in the structure of the particles but only adds certain specific features to their behavior due to the 'interaction' between them. In this relation, the hypothesis that dispersion of both crystal and glass of given chemical composition to the super-high degree of dispersibility (particles size is about 1 nm) will result in the formation of the disperse particles with identical structure [27] is not so trivial.

Many researchers of the amorphous states operate with such notions as the ordering degree, the disordering degree, the larger or the smaller order, ordering enhancement or weakening. In our opinion, the above and other equivalent formulations must concern SRO, IRO, mesoscopic structure or LRO definitely. This means that the 'intensity' of each order may vary within a wide interval from the total (ideal) order to the total (ideal) disorder. The descriptive abstract notions about the ordering value are often used to analyse different processes in the amorphous materials. At strict approach to studying the amorphous substances one has to operate legible quantitative criteria, which can define the ordering/disordering degree of the amorphous structure on any mentioned level.

One of such criteria can be the above correlation radius of the topologic order of the atomic network  $L$ . Other parameters of the structural ordering degree are also used. The most important of them are the symmetry elements of the first correlation function  $\Phi(\vec{x})$ , which completely succeeds the symmetry properties of the atomic network. In this case the structure with the higher symmetry is considered to be more ordered. Other ordering parameters can be the mean-square deviations (or dispersions) of the relevant topological parameters of the atomic network when setting their statistical distributions. If the system may transit by its whole volume to the totally ordered state, for example, due to crystallization, then the residual structural entropy that tends to a certain fixed value at the absolute temperature zero could be the measure of its disordering (and, respectively, ordering). One more approach to determine the ordering degree may be related to comparing this substance with the reference system.

The studies of the amorphous structure are complicated by the metastability of the amorphous state in general. This means that the character and degree of manifestation of different-type orders will depend not only on the type of

atoms included in the substance, but also on the external parameters (temperature, pressure). Due to the thermodynamical non-equilibrium, the structure of the particular amorphous substance will not be unique and will depend on the different kinds of the external influences after production. The number of the variables necessary for the unambiguous description of the structure of the amorphous state of certain substance is not known *a priori* [28]. For the same reason the structure of the amorphous substances is dynamical and could continuously vary with time [29], which is manifested in the relaxation of the principal physical and chemical properties of such substances. The similar liability also significantly complicates the studies of the structure of the disordered systems [5, 29, 30].

The structure of the atomic network of the crystals is formed under severe restrictions related to the necessity to realize the functional SRO, IRO, mesoscopic formations and LRO. Elimination of these restrictions in the amorphous substances expands considerably their 'creative capabilities'. This concerns both the freedom of realization of different new atomic configurations in the solids and formation of the homogeneous condensed systems in very wide limits of their chemical composition (for example, wide regions of vitrification in the chalcogenide systems). The possibility of large deviations from the stoichiometry allows the amorphous materials to be produced with chemical composition that by its structure and properties maximally corresponds to the particular problem of the material science.

In the amorphous substances, contrary to the crystalline ones, different atoms can be joined. The examples are the amorphous films of hydrogenated silicon Si:H, five-, six- and more component glass compounds. The atoms in such substances are not simply mixed mechanically, e.g. like the case of penetration of impurity atoms to the relevant places of the crystalline lattice. In the amorphous systems, new chemical linkage appears, which fixes new atomic configurations of disordered atomic network in the space [31].

The same atoms may manifest themselves differently in the amorphous and crystalline structure. The above-mentioned amorphous Si:H films are a bright example. The hydrogen atoms could be implanted into the silicon crystals as well. However, in the crystalline lattice they are the defects, whereas in the amorphous films the hydrogen atoms generate new structural configurations, which differ considerably from pure silicon ones [31]. These configurations are fixed as steric obstacles due to a large strength of the Si-H bonds and the geometric shape, which they acquire in the atomic network. Being distributed in the amorphous structure, they serve the effective barriers for the crystallization processes. At the same time the hydrogen atoms passivate the 'broken' silicon bonds and, thus, efficiently change the electro-physical properties of the amorphous Si-H films.

In the amorphous solids, the local 'oscillations' of the atomic coordination often exist [31]. Such behaviour of the atoms makes a basis for the appearance of new spatial distributions of the chemical bonds, new atomic configurations, which by their nature are non-crystalline and, thus, violate the tendency to the spatial periodicity of the atomic network. Therefore, formation of the amorphous state is especially peculiar for the substances comprising

atoms that are capable of changing the spatial coordination, i.e. B, C, S, Se, Te, transition metals and others [31].

Such peculiarity of the amorphous systems requires more comprehensive studies of not only the physical but also the chemical regularities of the solid body formation. And the lack of the chemical knowledge on the solids considerably restricts the development of the general theory of the structure of the amorphous systems [32]. As a result, the latter are often considered specific 'defective states' characterized by the deviation from the stoichiometry. Almost all amorphous substances are 'non-stoichiometric' compounds. In addition, though the stoichiometric rules are applicable in the amorphous solid chemistry, noncompliance with these rules is a characteristic attribute of these materials. The main cause of such properties of the amorphous substances is that in the most cases they have high-molecular structure [32]. Inclusion of such structures is also the necessary condition of studying the structure of their atomic network.

Consideration of the solid amorphous state as the polymer in many cases does not draw specific objections, though the covalent crystal could be considered the giant molecule with the three-dimensional carcass of the covalent bonds. The only doubt is caused by the use of this approach to the melts, when it is assumed that the glass forming compounds, unlike other ones, have the polymer structure that results in their high viscosity and, as consequence, in the ability of supercooling up to the transition to the solid amorphous state. This approach is more likely applicable for the high-molecular organic substances, though it is used in studying the inorganic solids as well. A bright example of this is the amorphous selenium. In Ref. [33], the high-molecular substances in the amorphous state are called the molecular amorphics. Certain molecules not being destroyed in the process of formation of the amorphous matrix are their basic structural elements. The size of the molecules in such substances can vary in a wide range.

Thus, the amorphous substance is not structureless, but it has a very complicated atomic network structure. Just for this reason, there are no clear unambiguous notions about the general structure of the amorphous state. In our opinion, the decisive point of the further structural studies of the amorphous substances is clarification of the peculiarities and role of the chemical bonds in the SRO and IRO formation in the disordered atomic networks. With this regard, it is necessary to give clear answers to a series of important questions. Does the certain ordering type of different scaling level occur in the amorphous substances due to the special chemical bonds action only, e.g., the bonds absent in the corresponding crystals of the same chemical composition? How are the topological peculiarities of the structure of the amorphous network related to the particular peculiarities of the chemical bonds realized in them? Do the qualitative distinctions between the bonds in the local sites with the continuous ideal atomic network and the bonds in the local sites of the network breaks exist? What does occur with the chemical bond network during the amorphous substance heating and at the phase transformations in them? In many cases one has to take into account the specific role of different defects in the realization of the particular properties of different-nature non-crystalline materials [22, 34-37].

In this context, we consider non-constructive the idea [38]. The authors state that the lack of LRO in the atomic network is not the most essential factor that defines the differences between the amorphous materials and crystals. More important role is played here by the own defects of the atomic network, the concentration of which in the amorphous materials can be quite large. Here we come to the important and poorly studied question of determination of the physical and chemical principles of clear distinguishing of different defects in the ideal disordered atomic networks. Note once more that above we analyzed the problems of the amorphous substance structure in the ideal network approximation. It was suggested to take the spatially topologically disordered atomic network as the above network, in which each atom realizes all its chemical bonds. It is obvious that any deviation from the ideal atomic network should be considered the defect provided that the concentration of such deviations is much less than the atomic density of this substance. This is due to the fact that the number of defects must be several orders less than the number of the atoms in the system. Otherwise, the 'defect' can be considered one of the possible structural fragments of the ideal disordered atomic network. More detailed analysis of the problems of the defects in the disordered atomic networks will be given in the next section.

Thus, the problems of studying the peculiarities of the disordered structure of the amorphous state lie in the different planes of the structural hierarchy, which are related to several scaling levels: SRO, IRO and the mesoscopic ordering of the atomic network and the nanostructure and microstructure (or substructure) of the matrix of the amorphous medium. Each of these levels is revealed specifically in the experimental results and reflects the interrelated and simultaneously specific processes of the structure formation in the amorphous substances.

Let us make some final comments concerning the relatively important methodic question: to what extent the amorphous and crystalline samples of certain chemical composition are structurally similar? Besides the mentioned above, here, in our opinion, one has to consider some crucial moments.

1. Only for a very limited circle of the amorphous substances there exist their crystalline analogs (basically, they are the elementary substances and compounds of the stoichiometric compositions of the complex systems). The overwhelming majority of the amorphous substances have no crystalline analogs and the question of the structural similarity has no sense for them. For example, what should we consider the crystalline analog of the  $\text{Ge}_5\text{As}_{15}\text{S}_{80}$  glass?

2. If the substance exists both in the crystalline and in the amorphous state, one may surely find separate small structural fragments in the amorphous state, which have the structure almost identical (with certain accuracy) to the crystalline one. In this case the degree of distinction of these structures will be determined by the quantitative deviations of the functional and probabilistic SRO in them.

3. In any amorphous substance, which has the crystalline analog, separate structural fragments must necessarily occur with SRO, which both quantitatively and qualitatively differ from the typically crystalline fragments (e.g., in the region of the existence of the amorphous germanium and silicon with 5 and 7 atomic circles in the amorphous matrix).

4. The structural elements untypical for their crystalline analogs may occur in the amorphous substances (for example, the  $As_4S_4$  molecules in the amorphous  $As_2S_3$  films).

5. With increasing size of the structural fragments the degree of their similarity will decrease abruptly for the amorphous and crystalline substances. The spatial limits remain here very important and unclear question related to such structural similarity.

Also today the task is to extend the scheme of experimental investigations of unordered materials, i.e. full description of the initial state from which the amorphous sample is formed – the control of any technological parameters of this sample produced – the investigation of the structure and its relaxation at any level – the studies of

the structurally-sensitive physical and chemical properties and their induced and spontaneous changes – the construction of a rigorous model – the complex analysis of the data obtained on any aforementioned stage. These also involve elucidation of the role of different technological factors in the processes of structure formation in the amorphous substances; development of new methodological approaches at structural investigations of the amorphous substances, elucidation of specific features of the amorphous substance polymorphism and phase transitions in these substances, determination of the role of the initial structure of the amorphous materials in their physical and chemical properties as well as in the process of their structural relaxation etc.

#### REFERENCES

1. Dove D.B. In: Physics of Thin Films. Advances in Research and Development, eds. G.Hass, M.H.Francombe, R.W.Hoffman, V.7, Academic Press, New York and London, (1973).
2. Dutchak Ya.I. Radiography of liquid metals. – Lvov.: Publisher at LSU "Vishcha shkola", 1977. – 162 p.
3. Price D.L., Susman S., Volin K.J., Dejus R.J. Intermediate-range order in binary and ternary glasses. – Physica. – 1989. – Vol. B 156-157. – P. 189-191.
4. Brodsky Mark H.: Combination dispersion of light in amorphous semiconductors in Light Scattering in Solids Ed. by Cardona. Springer-Verlag-Berlin-Heidelberg-New York, (1979).
5. A.Felts. Amorphe und Glasartige Anorganische Festkörper. Akademie-Verlag, Berlin. 1983.
6. V.M. Rubish, V.O. Stefanovych, O.H. Huranych, O.V. Horina, V.V. Rubish. Investigation of the structure of glass systems As-Sb-SI by Raman spectroscopy // Nanosystems, nanomaterials, nanotechnology, 2008. – V.6, № 4. – P. 101119-1127.
7. Kurmyshev E.V., Sisakyan I.N., MS Sharambeyan Relaxation glass model. – M.: 1985. – 23 p. (Preprint / GPI, №187).
8. Bondar V.V. Some questions of non-crystalline solid. – M., 1980. – 17 p. Dep. VINITI, №3750.
9. The dislocation theory of condensed matter. Potashinskiy A.Z., Shumilo B.I. – Novosibirsk, 1984. – 16 p. (Preprint) / Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the USSR, № 84-160.
10. Alexander S. Amorphous solids: their structure, lattice dynamics and elasticity. – Physical Reports. – 1998. – Vol. 296. – № 2-4. – P. 65-236.
11. Luca Cipelletti, Laurence Ramos. Slow dynamics in glasses, gels and foams. – Current opinion in colloid and interface science. – 2002. – Vol. 7. – P. 228-234.
12. Wyart R. On the rigidity of amorphous solids. – Cond. Mat. – 2005. – 0512155. – 113 p.
13. Lin A.J., Nagel S. Nature. – 1998. – Vol. 396. – N6706. – P. 21-27.
14. Shpak A.P., Rubish V.M. Glass formation and properties of chalcogenide alloys systems based on arsenic and antimony. – K.: IMP NASU, 2006. – 120 p.
15. Elliott S.R. Physics of amorphous materials. – London: Longman Scientific and Technical, 1990. – 481 p.
16. Shvarts K.K., Shpotyuk O.I., Kornelyuk V.N., Shunin Yu.N. Irreversible photo- and radiation-induced defects in amorphous arsenic trisulfide. – Proceedings of the Academy of Sciences of Latvia. SSR (series of phys. and tehn. Sciences). – 1990. – № 1. – P. 3-13.
17. Asokan S., Prasad M.V.N., Parthasarathy G., Gopal E.S.R. Mechanical and chemical thresholds in IV-VI chalcogenide glasses. – Phys. Rev. Letters. – 1989. – Vol. 62. – № 7. – P. 808-810.
18. Balmakov M.D. The impact of fluctuations in the properties of the structure of disordered systems // Vestnik Leningrad Physics and Chemistry (issue 2). – 1982. – № 10. – P. 104-106.
19. Itoh Satoshi, Fujiwara Takeo, Okazaki Makoto. Structural analysis of models for  $As_xS_{1-x}$  glasses. // J.Non-Cryst. Solids. – 1982. – Vol. 50. – № 1. – P. 49-60.
20. Vladimirov V.I., Romanov A.E. Disclinations in crystals. – L.: Nauka, 1986. – 224 p.
21. Dembovskiy S.A., Chechetkina E.A. Stekloobraeovaie. – M.: Nauka, 1990. – 278 p.
22. Electronic effects in chalcogenide glassy semiconductors / Ed. K.D. Tsendina. - Spb.: Nauka, 1996. - 486 p.
23. Novikov V.N. Nanostructures and low-energy vibrational excitations in vitreous materials. – Authoref. Dr. Dis. / Institute of Automation and Electrometry SB RAS. Novosibirsk, 1992. – 37 p.
24. Gaspard J.P., Mosseri R., Sadoc J.F. A corrugated-space generation of amorphous structures / The structure of non-crystalline materials. – London-New York: Taylor and Francis, 1983. – P.550-557.
25. Insulating and semiconducting glasses / Edited by P. Boolchand. – Singapore: World Scientific, 2000. – 882 p.
26. Malinovskiy V.K., Surovtsev N.V. Heterogeneity in the nanometer scale as a universal property of glass. - Glass Physics and Chemistry. – 2000. – Vol. 26. – №3. – P. 315-321.
27. Минаев В.С. Стеклообразование в халькогенидных полупроводниковых системах // Обзоры по электронной технике (Серия «Материаль»). – М.: ЦНИИ «Электроника». – 1983. – № 7 (980). – 34 с.
28. Amorphous Semiconductor Technologies & Devices, Ed. Y. Hamakawa, North-Holland, (1983).
29. Shvarts K.K. Physics of optical recording in dielectrics and semiconductors. – Riga: Zinatne, 1986. – 322 p.
30. Zaharov V.P., Gerasimenko B.C. Structural features of amorphous semiconductors. – Kiev: Naukova Dumka, 1976. – 280 p.
31. Ovshinsky S.R. Basic anticrystalline chemical bonding configurations and their structural and physical implications. – J.non-cryst. solids. – 1985. – V.75. – № 1-3. – P.161-167.
32. Aleskovskiy V.B. The stoichiometry of the synthesis and solid compounds. – L.: Nauka, 1976. – 140 p.
33. Sheka E.F. Spectroscopy of amorphous materials with a molecular structure // Successes of physical sciences. – 1990. – Vol. 160. – № 2. – P. 263-298.
34. Brodsky Mark H. Introduction in Amorphous Semiconductors. Ed. by M.H. Brodsky. Springer-Verlag-Berlin-Heidelberg-New York, (1979).
35. Mott N.F., Davis E.A. Electron Processes in Non-Crystalline Materials, Vol. 2, Clarendon Press, Oxford, (1979).
36. Madan A., Shaw M.P. The physics and applications of amorphous aemiconductors. – Boston: Academic Press, 1988. – 670 p.
37. Shimakawa K, Kolobov A, Elliott S.R. Photoinduced effects and metastability in amorphous semiconductors and insulators. – Adv. Phys. – 1995. – V.44. – P.475-588.
38. Petuhov A.G., Foygel M.G. Complexes of structural defects and photo-induced transformations in amorphous semiconductors. – Semiconductors. – 1987. – Vol. 21. – № 1. – P. 118-123.

## Вплив неоднорідностей показника заломлення на спектральні характеристики вузькосмугових оптичних фільтрів при зміні робочої довжини

О. Міца\*<sup>1</sup>, В. Пецко<sup>1</sup>, Є. Боркач<sup>2</sup>, С. Петрецький<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ужгородський національний університет, Ужгород, Україна,

<sup>2</sup>Закарпатський угорський інститут ім. Ференц Ракоці ІІ, м. Берегово, Україна

\*Corresponding author. E-mail: alex.mitsa@gmail.com

Paper received 02.06.15; Revised 20.06.15; Accepted for publication 23.07.15.

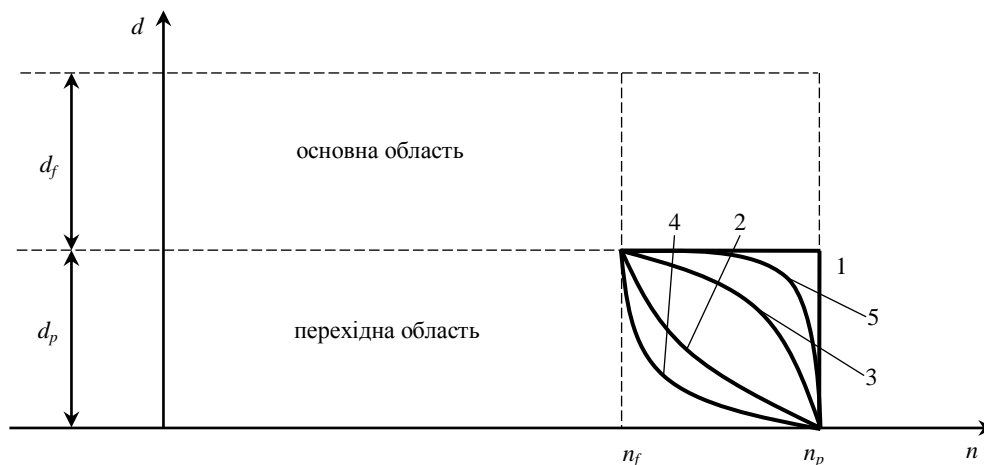
**Анотація.** В роботі досліджено вплив перехідної області з неоднорідним розподілом показника заломлення на спектральні характеристики вузькосмугових фільтрів в залежності від робочої довжини хвилі.

**Ключові слова:** характеристична матриця, спектральні характеристики, спектр пропускання, неоднорідності показника заломлення

Останнім часом синтез багат шарових оптичних систем набув чималого розвитку, успіхи цих досліджень впливають як на розвиток оптики, так і інших галузей науки та техніки. Тепер отримують інтерференційні фільтри будь-якого типу для всього оптичного діапазону заданими спектральними характеристиками [1, 2]. Одним із найактуальніших завдань в оптичному при-

ладобудуванні є створення вузькосмугових фільтрів, оскільки галузь застосування дуже широка – це астрофізика, хімія, медицина, матеріалознавство, сенсорика, приладобудування [2, 3].

Розглянемо наступну шаруватонеоднорідну модель [4-6] профілю показника заломлення плівки, яка включає в себе основну та перехідну області (рис. 1).



**Рис. 1.** Модель частково неоднорідної плівки (розподіли показника заломлення: 1 – ступінчастий; 2 – лінійний; 3 – квадратичний; 4 – логарифмічний; 5 – експоненціальний)

При розрахунках спектральних характеристик багат шарового покриття будемо враховувати тільки перехідну область у високозаломлюючій компоненті. Позначимо її товщину через  $d_p$ . Після проведення експерименту було виявлено, що геометрична товщина перехідної області ( $d_p$ ) може досягати до 30 нм. Задання неоднорідності показника заломлення з розподілом  $n(z)$  по товщині в перехідному шарі здійснюється наступним чином. Перехідний шар розбивається на  $m_p$  (в дослідженні вибиралось 10) рівних по товщині зон і значення  $j$ -ої зони перехідної області показника заломлення в залежності від типу розподілу визначається за відповідною формулою:

1) ступінчастий:

$$n_{pj} = n_f;$$

2) лінійний:

$$n_{pj} = n_f + \frac{(n_p - n_f)}{m_p - 1} \cdot (j - 1);$$

3) квадратичний:

$$n_{pj} = n_f + \frac{(n_p - n_f)}{(m_p - 1)^2} \cdot (j - 1)^2;$$

4) логарифмічний:

$$n_{pj} = n_f + \frac{(n_p - n_f)}{\ln(m_p)} \cdot \ln(j);$$

5) експоненціальний:

$$n_{pj} = n_f + \frac{(n_p - n_f)}{e^{m_p - 1} - 1} \cdot (e^{j-1} - 1);$$

де  $n_{pj}$  – показник заломлення  $j$ -тої зони при розбитті перехідної області;  $n_f$  – показник заломлення основної частини плівки;  $n_p$  – показник заломлення перехідної області.

Геометрична товщина центральної частини плівки ( $d_f$ ) у цьому випадку:

$$d_f(d_p) = \frac{1}{n_f} \left( \frac{\lambda_0}{k} - d_p \cdot n_{sp} \right), \quad (1)$$

де  $n_{sp} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m_p} n_{pj}$ ,  $n_{sp}$  – середнє значення показника заломлення в перехідному шарі відповідно;  $m$  – кількість розбиттів перехідного шару;  $k = 4$  – розглядається четвертьхвильовий шар;  $n_f$  – показник заломлення основної частини плівки;  $\lambda_0$  – робоча довжина хвилі.

Промодельюємо вплив перехідного шару в високозаломлюючій компоненті на спектральні характеристики за

допомогою матричного методу Абеле [4]. Вибираючи за параметри показник заломлення  $n$ , геометричну товщину шару  $d$  і довжину хвилі  $\lambda$ , можна записати характеристичну матрицю одного шару таким чином:

$$M_S(n, d, \lambda) = \begin{pmatrix} \cos(n, d, \lambda) & -\frac{i}{p} \sin \delta(n, d, \lambda) \\ -ip \sin \delta(n, d, \lambda) & \cos \delta(n, d, \lambda) \end{pmatrix} \quad (2)$$

де  $\delta(n, d, \lambda) = \frac{2\pi n d \cos \theta}{\lambda}$ ,  $i = \sqrt{-1}$ ,  $\theta$  – кут між променем і нормаллю до площини падіння. Значення  $p = n \cos \theta$  для ТЕ хвилі ( $s$ -поляризація) і  $p = \frac{n}{\cos \theta}$  для ТМ хвилі ( $p$ -поляризація).

Характеристична матриця перехідного шару буде рівна:

$$M_p(\lambda) = \prod_{j=0}^{m_p-1} M_S(n_{pj}, d, \lambda), \quad (3)$$

Розглянемо вузькосмуговий фільтр конструкції S-[xB(1-x)H]<sup>4</sup>2(1-x)V[xH(1-x)V]<sup>4</sup>. Будемо вважати, що високозаломлюючий шар містить перехідну область. Тоді його характеристична матриця буде рівною:

$$M_B(\lambda) = M_S(n_B, d_f(d_p), \lambda) \cdot M_p(\lambda), \quad (4)$$

де  $n_B$  – показник заломлення основної частини високозаломлюючого шару.

Низькозаломлюючий шар буде мати характеристичну матрицю рівною:

$$M_H(\lambda) = M_S(n_H, d_f(d_p), \lambda), \quad (5)$$

де  $n_H$  – показник заломлення низькозаломлюючого шару.

Тоді характеристична матриця  $(4k+1)$ -шарової структури задається формулою:

$$M(\lambda) = \prod_{i=1}^k (M_B(\lambda) \cdot M_H(\lambda)) \times M_S\left(n_B, \frac{1}{n_B} \left(\frac{\lambda_0}{2} - d_p \cdot n_{sp}\right), \lambda\right) \times \prod_{i=1}^k (M_H(\lambda) \cdot M_B(\lambda)) \quad (6)$$

Звідси ми легко можемо знайти коефіцієнт пропускання:

$$T = \frac{p_S}{p_0} |t|^2 = \frac{1}{4 \left(2 + \frac{p_0}{p_S} m_{11}^2 + \frac{p_S}{p_0} m_{22}^2 + p_0 p_S m_{12}^2 + \frac{1}{p_0 p_S} m_{21}^2\right)} \quad (7)$$

де  $p_0 = N_0 \cos \theta_0$  і  $p_S = N_S \cos \theta_S$  для ТЕ хвилі ( $s$ -поляризація);  $p_0 = \frac{N_0}{\cos \theta_0}$  і  $p_S = \frac{N_S}{\cos \theta_S}$  для ТМ хвилі ( $p$ -поляризація);  $\theta_0$  – кут під яким промінь на шаруваті структуру;  $\theta_S$  – кут під яким промінь попадає із шаруватої структури, кут заломлення;  $n_0, n_S$  – показники заломлення зовнішнього середовища і підкладки відповідно,  $m_{11}, m_{12}, m_{21}, m_{22}$  – елементи характеристичної матриці  $M$ .

Вплив перехідної області на спектральні характеристики вузькосмугових фільтрів при зміні робочої довжини розглянемо на прикладі 17-шарового вузькосмугового фільтра S-VNB..2B..VNB, для якого показник заломлення високо заломлюючого шару  $n_B=2,3$  та низького  $n_H=1,35$  осадженими на підкладки із скла К-8 з  $n_S=1,51$  та оптичними товщинами рівними  $nd = \frac{\lambda_0}{4}$ , показник заломлення перехідної області  $n_p=2,6$ .

Розглянемо ступінчастий розподіл показника заломлення (оскільки найбільше на всі спектральні характеристики впливає ступінчастий розподіл [5]), то будемо розглядати саме цей розподіл.

При наявності перехідної області з ступінчастим розподілом показника заломлення, коефіцієнт пропускання при  $\theta_0=0^\circ$  при робочій довжині хвилі  $\lambda_0=480$  нм зменшується на  $\Delta T=0,02883308$  (табл. 1, в якій подані значення коефіцієнта пропускання для ступінчастого розподілу показника заломлення), при  $\lambda_0=630$  нм – на  $\Delta T=0,0217706$ , при  $\lambda_0=750$  нм – на  $\Delta T=0,0175378$ , при  $\lambda_0=1000$  нм – на  $\Delta T=0,0115229$  і при  $\lambda_0=3000$  нм – на  $\Delta T=0,00015864$ . Звідси випливає, що із збільшенням робочої довжини хвилі, значення коефіцієнта пропускання в точці мінімуму менше відрізняється від ідеального випадку, що спостерігається для всіх кутів обох поляризацій.

Таблиця 1. Значення коефіцієнта пропускання для ступінчастого розподілу показника заломлення

Робоча довжина хвилі фільтра	0°	30°	45°	56°48'	60°	75°	
S-поляризація	480	0,9870457	0,9776190	0,9565078	0,91432448	0,8929391	0,6834261
	630	0,9804855	0,9688199	0,9439835	0,8981770	0,8741932	0,6622928
	750	0,9762527	0,9632034	0,9363142	0,8874990	0,8634601	0,6490945
	1000	0,9702379	0,9553672	0,9255525	0,8735697	0,8479316	0,6297038
	30000	0,9603013	0,9425345	0,9083275	0,8511620	0,8237071	0,6007351
P-поляризація	480	0,9870457	0,9947447	0,9999702	0,9924089	0,9840422	0,8558164
	630	0,9804855	0,9904630	0,9991171	0,9958738	0,9891690	0,8684357
	750	0,9762527	0,98746496	0,9980849	0,99744213	0,9917721	0,8749830
	1000	0,9702379	0,9829792	0,9961158	0,9989569	0,9947086	0,8827127
	30000	0,9603013	0,9751334	0,9918654	0,9999818	0,9979746	0,8924824



Розглянемо зсуви точки максимуму пропускання при різних робочих довжинах хвиль для ступінчастого показника заломлення (табл. 2.). При  $\theta_0=0^\circ$  при робочій довжині хвилі  $\lambda_0=480$  нм відбувається зсув точки максимуму пропускання в область довгих хвиль на  $\Delta\lambda=19,05$  нм, при  $\lambda_0=630$  нм на  $\Delta\lambda=20,84$  нм, при

$\lambda_0=750$  нм на  $\Delta\lambda=21,71$  нм, при  $\lambda_0=1000$  нм на  $\Delta\lambda=22,74$  нм і при  $\lambda_0=3000$  нм на  $\Delta\lambda=24,10$  нм. Отже, із збільшенням робочої довжини хвилі, при наявності перехідної області, збільшується зсув точки максимуму пропускання в область довгих хвиль, що характерне для всіх кутів обох поляризацій.

Таблиця 2. Робоча довжина хвилі для ступінчастого розподілу показника заломлення, нм

Робоча довжина хвилі фільтра		0°	30°	45°	56°48'	60°	75°
S-поляризація	480	499,05	480,33	461,12	445,8	441,44	426,75
	630	650,84	626,15	600,81	580,59	574,84	555,45
	750	771,71	742,18	711,87	687,68	680,79	657,58
	1000	1022,74	983,07	942,31	909,76	900,49	869,23
	30000	3024,1	2902,87	2778,09	2678,26	2649,82	2553,8
P-поляризація	480	499,05	479,17	457,42	438,7	433,08	412,27
	630	650,84	624,49	595,66	570,85	563,4	535,72
	750	771,71	740,24	705,81	676,18	667,29	634,21
	1000	1022,74	980,68	934,67	895,09	883,21	839,15
	30000	3024,1	2898,22	2760,50	2642,11	2606,66	2478,02

При наявності перехідної області з ступінчастим розподілом показника заломлення, півширина пропускання  $\delta\lambda_{0,5}$  при  $\theta_0=0^\circ$  при робочій довжині хвилі  $\lambda_0=480$  нм зменшується на  $\Delta\lambda=0,83$  нм, при  $\lambda_0=630$  нм – на  $\Delta\lambda=0,81$  нм, при  $\lambda_0=750$  нм – на  $\Delta\lambda=0,76$  нм, при  $\lambda_0=1000$  нм – на  $\Delta\lambda=0,65$  нм, і при  $\lambda_0=3000$  нм – на  $\Delta\lambda=0,20$  нм. Десятична ширина пропускання  $\delta\lambda_{0,1}$  при  $\theta_0=0^\circ$  при робочій довжині хвилі  $\lambda_0=480$  нм зменшується на  $\Delta\lambda=2,61$  нм, при  $\lambda_0=630$  нм – на  $\Delta\lambda=2,55$  нм, при  $\lambda_0=750$  нм – на  $\Delta\lambda=2,41$  нм, при  $\lambda_0=1000$  нм – на  $\Delta\lambda=2,04$  нм, і при  $\lambda_0=3000$  нм – на  $\Delta\lambda=0,66$  нм. Отримаємо, що із збільшенням робочої довжини хвилі, для напівширини та десятичної ширини зменшуються відхилення від ідеального випадку, що спостерігається для всіх кутів обох поляризацій.

При наявності перехідної області з ступінчастим розподілом показника заломлення, ширина спектрального інтервала подавлення пропускання  $\Delta\lambda_K$ , всередині якого пропускання менше 0,1 для області менш короткохвильової як  $\lambda_{max}$ , при  $\theta_0=0^\circ$  при робочій довжині хвилі  $\lambda_0=480$  нм збільшується на  $\Delta\lambda=14,49$  нм, при  $\lambda_0=630$  нм – на  $\Delta\lambda=14,80$  нм, при  $\lambda_0=750$  нм – на  $\Delta\lambda=14,32$  нм, при  $\lambda_0=1000$  нм – на  $\Delta\lambda=12,95$  нм, і при  $\lambda_0=3000$  нм – на  $\Delta\lambda=7,83$  нм. Ширина спектрального інтервала подавлення пропускання  $\Delta\lambda_D$ , всередині якого пропускання менше 0,1 для області більш довгохвильової чим  $\lambda_{max}$ , при  $\theta_0=0^\circ$  при робочій довжині хвилі  $\lambda_0=480$  нм збільшується на  $\Delta\lambda=23,80$  нм, при  $\lambda_0=630$  нм – на  $\Delta\lambda=21,04$  нм, при  $\lambda_0=750$  нм – на  $\Delta\lambda=19,23$  нм, при  $\lambda_0=1000$  нм – на  $\Delta\lambda=16,45$  нм, і при  $\lambda_0=3000$  нм – на  $\Delta\lambda=9,79$  нм. Звідси випливає, що із збільшенням робочої довжини хвилі (починаючи з  $\lambda_0=630$  нм) для даних інтервалів зменшуються відхилення від ідеального випадку, що спостерігається для всіх кутів обох поляризацій.

Розглянемо випадок, коли кількість шарів у фільтрі S-BNB..2B..BNB збільшується при робочій довжині хвилі  $\lambda_0=630$  нм. Так, наявність перехідної області зі ступінчастим розподілом показника заломлення у високозаломлюючій компоненті для 17-шарового відрізаючого фільтра S-BNB..BNB приводить до збільшення коефіцієнта пропускання на  $\Delta T=0,0217706$  відносно ідеального випадку, зміщення робочої довжини хвилі в область довгих хвиль на  $\Delta\lambda=20,84$  нм, зменшення півширини пропускання  $\delta\lambda_{0,5}$  на  $\Delta\lambda=0,81$  нм, зменшення десятичної ширини пропускання  $\delta\lambda_{0,1}$  на  $\Delta\lambda=2,55$  нм, збільшення спектрального інтервалу  $\Delta\lambda_K$  на  $\Delta\lambda=14,80$  нм, збільшення спектрального інтервалу  $\Delta\lambda_D$  на  $\Delta\lambda=21,04$  нм. Для 25-шарового відбувається збільшення коефіцієнта пропускання на  $\Delta T=0,02174216$  відносно ідеального випадку, зміщення робочої довжини хвилі в область довгих хвиль на  $\Delta\lambda=20,80$  нм, зменшення півширини пропускання  $\delta\lambda_{0,5}$  на  $\Delta\lambda=0,14$  нм, зменшення десятичної ширини пропускання  $\delta\lambda_{0,1}$  на  $\Delta\lambda=0,42$  нм, збільшення спектрального інтервалу  $\Delta\lambda_K$  на  $\Delta\lambda=13,14$  нм, збільшення спектрального інтервалу  $\Delta\lambda_D$  на  $\Delta\lambda=18,96$  нм. Як бачимо, ці відхилення є меншими, ніж у випадку з 17-шаровими структурами. Подальше збільшення шарів теж зменшує різницю між ідеальним випадком різних меж між плівками при наявності перехідної області у високозаломлюючій компоненті. Це спостерігається при всіх можливих робочих довжинах хвиль і довільних кутах падіння світла

**Висновки.** Виявлені особливості спектральних характеристик частково неоднорідних плівок з різним типом розподілу показника заломлення на межах розділу та математичне моделювання їх структури дозволяють розширити можливість застосування плівок некристалічних матеріалів в практиці конструювання та виготовлення оптичних покриттів.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Яковлев П.П. Проектирование интерференционных покрытий / П.П. Яковлев, Б.Б. Мешков – М.: Машиностроение, 1987. – 192 с.
- [2] Путилин Э.С. Оптические покрытия. Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 227 с.
- [3] Крылова Т.Н. Интерференционные покрытия [Текст] / Т.Н. Крылова. – Л.: Машиностроение, 1973. – 224 с.
- [4] Furman, Sh. Basics of optics of multiplayer systems [Text] / Sh. Furman., A.V. Tikhonravov. – Editions Frontiers, Gifsur Yvette, 1992. – 242 p.
- [5] Пецко В.І., Міца О.В. Моделювання впливу неоднорідностей на спектральних характеристик вузькосмугових оптичних фільтрів // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – 4/5(70). – С. 15-20.
- [6] Mitsa, V. Holomb, R., Kondrat, O., Popovych, N., Tsud, N., Matolín, V., Prince, K., Petretskiy, S., Tóth, S. Synchrotron XPS studies of illuminated and annealed flash evaporated a-Ge<sub>2</sub>S<sub>3</sub> films. Journal of Non-Crystalline Solids. – 2014. – Vol. 401, P. 258-262.

#### REFERENCES

- [1] Yakovlev, P.P. Designing interference coatings / P.P. Yakovlev, B.B. Meshkov – M.: Engineering, 1987. – 192 p.
- [2] Putilin, E.S. Optical coatings. Tutorial. – St.-Petersburg: SPbSU ITMO, 2010. – 227 p.
- [3] Krylova, T.N. Interferential coatings [Text] / T.N. Krylova. – L.: Engineering, 1973. – 224 p.#
- [4] Furman, Sh. Basics of optics of multiplayer systems [Text] / Sh. Furman., A.V. Tikhonravov. – Editions Frontiers, Gifsur Yvette, 1992. – 242 p.
- [5] Petsko, V.I., Mitsa, O.V. Modelling the impact of irregularities on narrowband spectral characteristics of optical filters // Eastern European Journal of advanced technologies. – 2014. – 4/5 (70). – P. 15-20.
- [6] Mitsa, V. Holomb, R., Kondrat, O., Popovych, N., Tsud, N., Matolín, V., Prince, K., Petretskiy, S., Tóth, S. Synchrotron XPS studies of illuminated and annealed flash evaporated a-Ge<sub>2</sub>S<sub>3</sub> films. Journal of Non-Crystalline Solids. – 2014. – Vol. 401, P. 258-262.

#### **Effect of inhomogeneities of the refractive index in spectral characteristics of narrowband optical filters by changing the working length**

**O. Mitsa, V. Petsko, E. Borkach, S. Petretskiy**

**Abstract.** In this work the influence of transition region with an inhomogeneous distribution of the refractive index for the spectral characteristics of narrow-band filters, depending on the operating wavelength, was studied.

**Keywords:** characteristic matrix, the spectral characteristics, the transmission spectrum, inhomogeneities of the refractive index

TECHNICAL SCIENCES

## High temperature thermos-cyclical treatment as a method of influencing the structure and properties of carbonized 20Mn steel

O.P. Cheiliakh, N.E. Karavaieva\*

Przazovskiy State Technical University, Mariupol, Ukraine

\*Corresponding author. E-mail: natkaravaeva@ya.ru

Paper received 30.06.15; Revised 10.07.15; Accepted for publication 17.07.15.

**Abstract.** The paper discusses the issues of improving the mechanical properties and wear resistance of structural steel working under wear conditions. A method for the surface treatment of the complex, which consists in carrying out carburizing and subsequent high temperature thermal cycling (HTTC) was suggested. The proposed method allows to increase processing density carbides, crushed and make its structure more uniform. After HTTC, followed by hardening from different temperatures in the structure of martensite formed, globular carbides and residual austenite. The residual austenite is capable of deformation martensite  $\gamma \rightarrow \alpha'$  transformation at wear (DMTW), increasing the relative wear resistance of the investigated steel by 2-2.5 times depending on the conditions of wear.

The practical value of the work lies in the fact that by changing of surface treatment quantitative relationship between martensite and austenite can be adjusted, to vary the degree of metastable austenite, getting into the surface layers of differentiated chemical composition and structure gradient without the use of special equipment and without creating special sections at thermal workshops.

**Keywords:** complex surface treatment, carburizing, metastable austenite, thermal cycling, wear resistance

One of the main tasks undertaken at enterprises, is a resource-saving due to constantly rising prices for iron ore and other materials, and as a result, the metal. Increased durability of spare parts from various steels for tools and equipment engineering and metallurgical plants can significantly reduce the consumption of materials.

In the operation of the most intensely subjected to temperature and power effects of the surface layers of parts and tools, so that the structure and properties of the surface layers has an important impact on their performance. Solving this problem requires the improvement of existing and creation of new methods of processing metals. Its solution is currently is associated with intensive spread along with other types of thermal and chemical-thermal treatment, thermal cycling treatment (TCT), which allows to improve the mechanical properties not only in the leading edge, but also over the entire volume tool [1-4].

With TCT alloy matrix which undergoes a phase transformation (for example, iron-based alloys) there are significant interfacial diffusion strain at repeated transformations, as well as the temperature gradients between the

individual elements of the matrix, which leads to an increase in transformation centers and, ultimately, to the grain refinement [5]. It was established [6-8] that TCT has a significant impact on the structural state of carbides. Method of TCT provides unique structure and properties of metals [6].

Unlike other kinds of heat treatment structural phase transitions occur when TCT is repeatedly applied at varying temperature heating-cooling. Necessity of repetitive processing at given temperatures, is usually due to the tendency to accumulate changes dramatically improves products quality and give them properties unattainable by ordinary heat treatment [7, 8].

Much attention is paid to studying the effect of the alternating repetition of processes of mutual dissolution – ferro-carbide allocation between mixture and austenite on the mechanical properties of carbon tool steel, which improves the toughness while maintaining high hardness and strength. The impact on the wear resistance of steels by TCT has not been thoroughly studied yet.

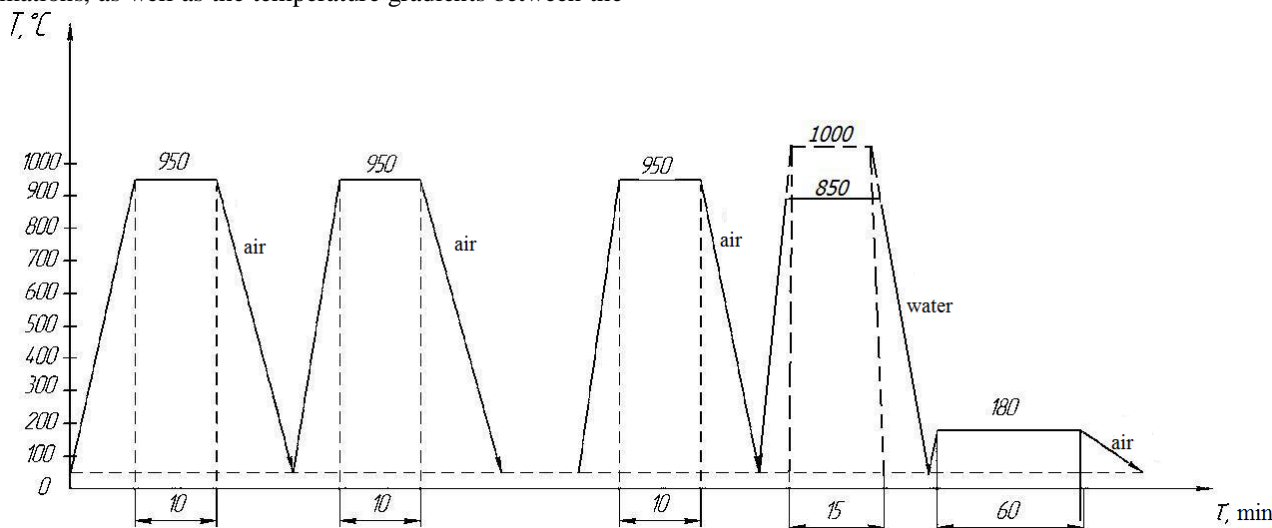


Fig. 1. Charts HTTC (950↔20°C) followed by hardening with a temperature of 850°C and 1000°C carburized steel 20Mn.

The purpose to this work is creation of new ways to TCT for optimum microstructure and improving the wear resistance of carburized steel 20Mn.

This study examines the effect of the parameters of high-temperature thermal cycling treatment (HTTCT) on the structure and properties of the carburized steel 20Mn. The steel major alloying element is manganese, relatively inexpensive and available in Ukraine.

Samples of steel 20Mn sizes 10x10x25 mm exposed to grouting solid carburizer for 12 hours with cooling in a box. Thereafter HTTCT conducted with heating to 950 °C ↔ 20 °C (cooling to room temperature in air), then quenching the last cycle the water temperature to 850 °C and 1000 °C and tempering at a low 180 °C. The number of cycles was 5, 11 and 17 (quenching from a temperature of 850 °C) and 2, 8 and 14 cycles (quenching from 1000 °C). Driving modes HTTCT are shown in Fig. 1.

After the standard mode of heat treatment applied in the production of (normalization at 880-900 °C, air cooling), 20Mn steel structure consists of 25 % pearlite and 75 % ferrite (Fig. 2a). After the grouting, and then develop a regime for HTTCT, the steel structure is milled. After 2 cycles of HTTCT regime 950 ↔ 20 °C at the surface of the sample is observed austenitic-martensite structure, there are some fairly large selection cementite (Fig. 2, b).

Micro-hardness  $H_0 = 4400$  MPa confirms the presence in the structure of high residual austenite ( $A_{res}$ ).

At a depth of 0.8 mm is observed structure of a mixture of martensite, cementite, and residual austenite ( $A_{res}$ ). Cementite allocation large enough, and martensite needle. At a depth of about 1.1 mm is also observed structure predominantly martensite and cementite. Austenite is practically not observed, cement, fine. Micro-hardness in this area reaches 6200 MPa (Fig. 3). At a depth of 1.3-1.6 mm structure is gradually transformed into a granular pearlite, cementite particles increase in size. Micro-hardness changes are few and within 3800-4500 MPa.

TCT, grinding particles of carbides and their density, finely martensite structure and makes it more homogeneous [9].

After 8 cycles HTTCT nature of the change in thickness of the microstructure has the same character as described after 2 cycles HTTCT. In the depths of carburized layer hardness varies ambiguous. Martensite needle observed in some places the structure at a depth of 0.6-0.7 mm, and the micro hardness is 5700 MPa. At a depth of 1.8-2.3 mm there is a typical structure of the granular pearlite, the corresponding source. Micro hardness in these regions decreases to 4250 MPa.

With increasing number of cycles to 14 cycles HTTCT predominantly cementite dissolve in austenite. Grain boundary carbides are allocated string, but in part they are dissolved, it turns carbon rich austenite (Fig. 2c). On dove 0.1-0.4 mm micro hardness is 5500-6000 MPa, and then it decreases to 4500 MPa, and at a depth of 1-1.5 mm is increased again to 6500 MPa. The structure becomes more uniform fine grain. At greater depths in the thickness of samples produced structure troosto - martensite. Martensite needle are only visible in individual grains. The micro hardness at a depth of 1.6-2 mm is reduced to 4500 MPa. Isolation cementite is very dispersed, the particles have a globular shape.

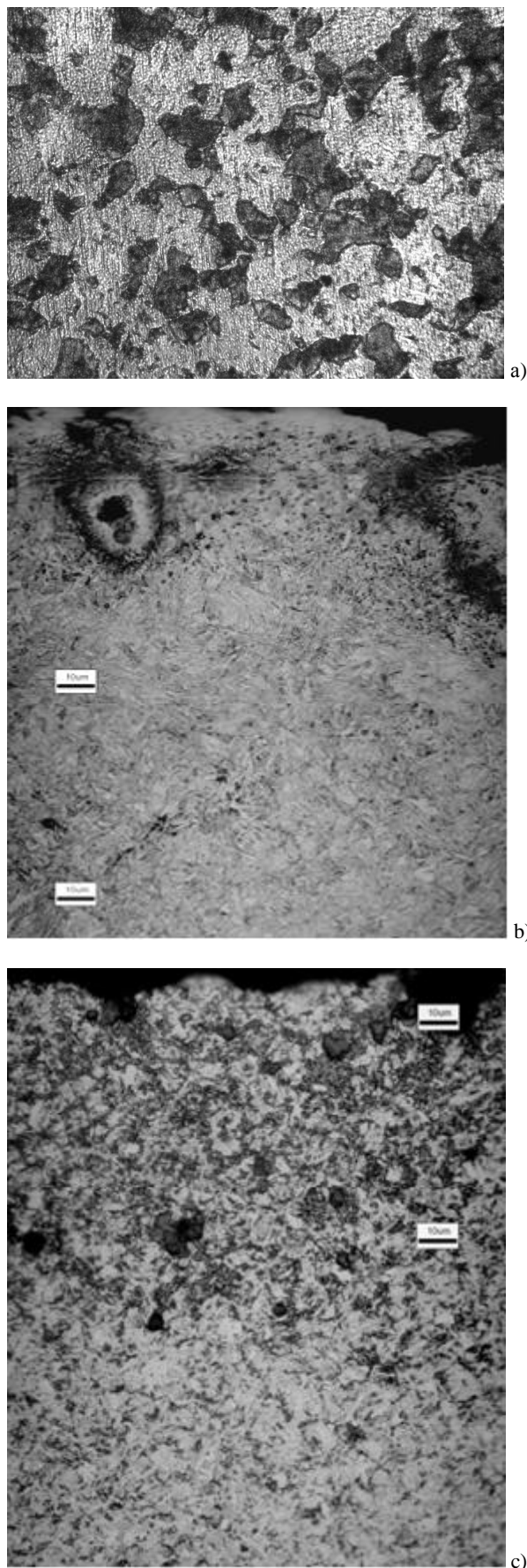


Fig. 2. The microstructure of steel 20Mn: a) after the standard mode of heat treatment (normalization) (x1200); b) after 2 cycles of HTTCT regime 950 ↔ 20 °C; c) after 14 cycles of HTTCT regime 950 ↔ 20 °C.

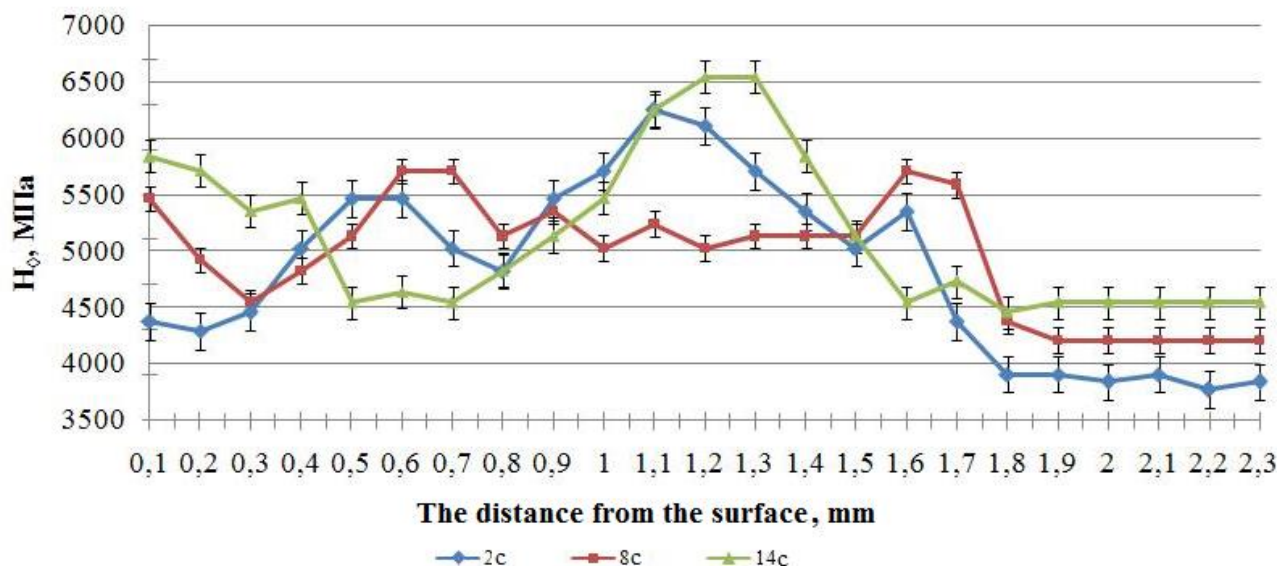


Fig. 3. Micro hardness carburized steel 20Mn after HTTCT (950 °C ↔ 20 °C), hardening from 1000 °C and tempering at 180 °C.

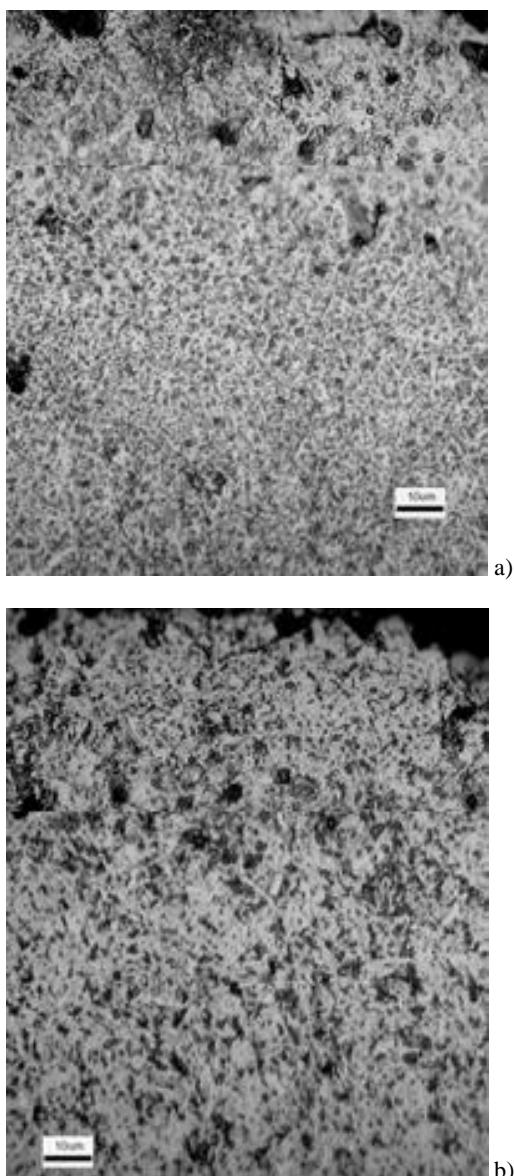


Fig. 4. The microstructure of carburized steel 20 Mn, after HTTCT (950 °C ↔ 20 °C), 850 °C by hardening and tempering at 180 °C: a) 5 cycles; b) 11 cycles.

It is noteworthy that with the increase in the number of cycles HTTCT from 2 to 14, the microhardness of the surface of samples increases from 4300 MPa to 5500 MPa, which can be attributed to structure refinement and enrichment of austenite.

Analysis of changes in the structure over the thickness of the samples after different modes HTTCT showed that it is very suitable for structure refinement and obtaining cementite precipitates dispersed phase. During the TCT changes the structure, size and morphology of carbides; at the same time decreasing the level of stress [2, 10, 11].

After thermal cycling regime by 950 °C ↔ 20 °C, followed by quenching with a temperature of 850 °C and low tempering at 180 °C (number of thermal cycles 5, 11 and 17) in the structure is observed martensite, residual austenite and cementite. With increasing number of cycles of the structure, as in the previous case, is milled. After 5 cycles HTTCT at a depth of 0.9-1.7 mm observed martensite structure, globular cement and  $A_{res}$  (Fig. 4).

The micro hardness to a depth of 0.7 mm is in the range of 4500 MPa, then increased to 6500 MPa, and at a depth of 1.7 mm is reduced again, because of a decrease in the content  $A_{res}$  content increases martensite. Then, the depth of the microstructure is gradually transformed into the structure of the core - globular sorbite.

The highest rates of relative wear resistance under the dry sliding friction of metal on metal are observed after 2 cycles HTTCT (quenching from 1000 °C) ( $\epsilon = 2$ ) and after the 11 cycles HTTCT (quenching from 850 °C) ( $\epsilon \approx 2,6$ ) (Fig. 5, a, b). In these circumstances it is advisable to obtain the structure along with martensite and carbides metastable  $A_{res}$ . Precipitation of cementite, in turn, destabilize the residual austenite and to further facilitate its deformation martensite transformation in wear (DMTW).

With abrasive wear among fused samples after 2 cycles HTTCT (hardening from 1000 °C), 5-minute and 11-minute cycles HTTCT (hardening with a temperature of 850 °C) have high and similar values of relative wear resistance ( $\epsilon_{abr} \approx 2.5$ ) (Fig. 5 a, b).

This can be explained by the fact that the abrasive wear is more intense effect on the abrasive surface of the sample. The structure, with a high content of metastable  $A_{res}$  is for this kind of optimal wear.

Overall, the rise in the relative wear resistance can be attributed to obtain the optimal structure - martensite and carbides  $A_{res}$  capable of DMTW. Just formation under hard carburized and hardened

surface layer softer than usual layer (with low carbon content) inhibits propagation of cracks occurring in the surface hardened layer.

The practical value of the work lies in the fact that changes in the parameters can be adjusted TCT quantitative relationship between austenite and martensite, to vary the degree of metastable austenite, getting into the surface

layers of different chemical composition and structure. The developed technology will enable TCT after thermo-chemical treatment implement them with conventional equipment (salt baths, chamber and shaft furnaces), thermal management without the use of additional equipment and the creation of specialized areas.

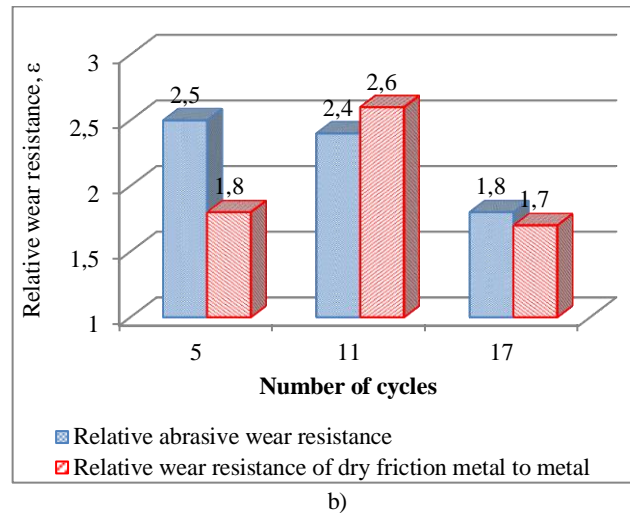
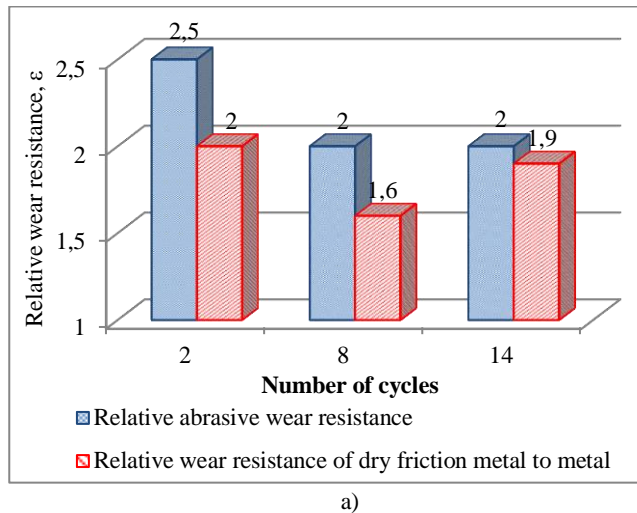


Fig. 5. Relative abrasive wear resistance and wear resistance under dry sliding friction metal to metal carburized steel 20Mn after HTTCT with different number of cycles and the hardening of: a) 1000 °C; b) 850 °C (leave at 180 °C).

### Conclusions:

1. Conducting thermo- cycling treatment carburized steel 20Mn allows grind microstructure effectively adjust the balance of phases: martensite quenching cementite and retained austenite, as well as its degree of metastability.
2. Description of the mechanical and performance properties of the steel 20Mn can be widely changed by using chemical-thermal treatment and subsequent thermal cycling, to regulate the phase composition and the degree of metastable austenite.
3. After the optimal regimes HTTCT and subsequent hardening carburized steel 20Mn can significantly increase its durability.
4. A significant increase in wear resistance is due to the optimum conditions HTTCT and creating a favorable microstructure dispersed carbides. An additional contribution to the improvement of wear resistance of carburized steel 20Mn making optimal development  $\gamma \rightarrow \alpha'$  DMTW transformation in the surface layer of the work, causing extra self-strengthening.
5. Optimal modes of HTTCT can be recommended for the restoration of a number of worn parts of metallurgical equipment operating under wear and thermal cycling simultaneously.

### REFERENCES

- [1] Vlasova, O.A. Increase of operational properties of tool steel by thermal cycling treatment: Diss. cand. tech. sc. – 2001. – 186 p.
- [2] Guriev, A.M. Thermal cycling and thermal cycling chemical-hardening steels / A.M. Guriev, L.G. Voroshnin, Y.P. Haraev, B.D. Lygdenov, S.A. Zemlyakov, O.A. Gurieva, A.A. Kolyadin, O.V. Popova // Polzunovsky Gazette №2 (h. 2) 2005. – 36 p.
- [3] Reynaga M. M. Development of micro-alloyed cast high speed steel R6M5-based structural studies: Diss. cand. tech. sc. – Minsk. 1985. – 214 p.
- [4] A.S. 1102815 USSR. With MKI 21 D 9/22, 1/78. A method of heat treatment hypereutectoid steel / V.S. Biront.
- [5] Guryev, A.M., Voroshnin, L.G. and others. The method thermocycling treatment of tool steels // Patent №2078440, RF, cl. With 21 D 1/78 on 27.14.97.
- [6] Fedyukin, V.K. The method of thermal cycling treatment of metal materials. LDNTP 1979. – 24 p.
- [7] Fedyukin, V.K. Thermocyclic metalworking and machine parts / V.K. Fedyukin, M.E. Smagorinsky - A.: Engineering. Leningrad. Dep-set. 1989. – 255 p.
- [8] Tikhonov, A.S. Thermocyclic steels and alloys and composite materials / A.S. Tikhonov, I.G. Leushin et al. – M. : Nauka, 1984 – 186 p.
- [9] Ivashchenko V.Y. Using thermal cycling for processing die steels / V.Y. Ivashchenko, A.P. Cheylyah // Herald of Azov State Technical University, 2011. – Series: Engineering, Vol. 22.
- [10] Fedyukin, V.K. The method of thermal cycling metal working / V.K. Fedyukin // L. : LGU Publishing, 1984. – 192 p.
- [11] Guryev, A.M. The study of diffusion processes in the steel under cyclic thermal exposure / A.M. Guryev [et al.] // Barnaul Polzunovsky Gazette, 2003. – № 1. – P. 45-49.

## Application of immune focus phytosyrups in yogurt technology

Yu. Hachak\*, O. Myhaylytska, V. Binkevych, J. Vavrysevych, O. Binkevych

Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies named after S.Z. Gzhytskyj, Lviv, Ukraine

\*Corresponding author. E-mail: ola75@ukr.net

Paper received 20.05.15; Revised 26.05.15; Accepted for publication 29.05.15.

**Abstract.** The work is devoted to studying the possibility of directing the immune phytosyrups "Echinacea" and "Immune" in technology yogurt. Research proved the feasibility of making syrups and method in the production of yogurt. Experimentally the optimal dose for entering phytosyrup the production of yogurt. It is based on the proved result that the use of syrups "Echinacea" and "Immune" dairy drinks in technology expands the product range of health-care areas. Application of immune phytosyrup direction "Echinacea" and "Immune" in technology yogurt does not require the use of additional process equipment.

**Keywords:** technology, yogurt, echinacea, wild rose, elderberry, mountain ash, organoleptic quality

**Introduction.** Among the public effective ways of protecting the population in the complex environmental situation it is established food enterprises manufacture of health care supplies, including milk. Given the current difficult environmental conditions, there is an urgent need to improve the structure of nutrition by improving the quality, biological value and taste characteristics of products. An important area in this respect is the fortification of food with vitamins, minerals and immune substances, especially on a natural basis. Milk products are not exception in this regard [3, 6, 10, 13, 14].

According to literature reports recently received considerable attention dairy products with high nutritional value and is enriched with vitamins and minerals through the introduction of functional ingredients. One of the requirements that apply to the latter is their reality.

It is known that the basis of functional food technology is their have high content of nutritional components, ability to influence certain parts of the potential consumer. Dairy products, however, are natural members of the group. Therapeutic and prophylactic properties of dairy products due to the favorable effect on the human body substances and microorganisms (lactic acid, alcohol, carbon dioxide, antibiotics, vitamins), formed as a result of biochemical processes that occur during fermentation of milk. Assimilation of dairy products has higher digestibility than milk because they act on the secretory activity of the stomach and intestines, causing digestive tract cancer intense isolated enzymes that accelerate the digestion of food. As you know, recently very popular in modern conditions become therapeutic and prophylactic products that have medicinal properties. It should be noted that today is rapidly increasing role of fillers in the production of dairy products. This issue is the subject of numerous research scientists [1, 2, 11, 12].

So, L. Yamschytka, I. Tryahub, R. Pavlyuk, L. Pavlotytsky offer shortbread recipes enriched wiyh pollen. R. Holub, R. Pavlyuk, S. Stoyev developed functional recipe of ice cream "Vitamin strawberry" and "Vitaminska" were they use kriopast of cranberry and strawberry. K. Kostrova, V. Pogarska, A. Berestova recommend new types of functional beverages based on whey and pumpkin puree. M. Osadcha, V. Pocharska, A. Berestova offer new types of nanostructured with pumpkin puree and citrus and functional ice cream with their use. S. Radchenko, R. Pavlyuk developed and offered the recipes of processed cheese enriched with kriopastam of celery and garlic. New processed cheese "Delicate" and "Hercules" with the addition of nanostructured dietary supplements

with parsley and dill, characterized by a high content of dietary supplements and extended shelf offering by O. Utva, V. Paharska, N. Korobets, I. Yurchenko, and O. Uriyeva developed new kinds of functional health of processed cheese "Laktofit", "Laktokarotynka" and "Laktooranzhyn" enriched with natural dietary supplements of plant material. Mohyla N. and Lysogor T. examined the positive effects of herbal supplements like antioxidants storage spreads. Smagin A. and Bala-shenko M. found that the powder of dried plant material (leaves of nettle, hawthorn berries) are active stabilizers storage ghee. Statutory organoleptic properties of oil when applying powder with carrots explored by T. Rashevsky, O. Vasheka [4, 5, 7, 8, 9].

As for our research, a promising and interesting direction is the use of herbal supplements in various forms: in the form of hoods, and kriopowders, phytosyrup of new generation of well-defined functions. Use phytosyrup in technology such popular products as milk drinks, including use as a milk-based sweet nonfat yogurt, not only expand the range of health care dairy products, but to ensure population immunity.

In view of the above, in our opinion, is the use of appropriate technology in dairy drinks herbal syrups "Echinacea" and "Immune".

Syrup "Echinacea" (TU 15.8-30590731-019: 2011) – produced as a result of extraction of medicinal plants - Echinacea purpurea (Echinacea purpurea), a dietary supplement to diet, creates optimal conditions for improving immunity and overall strengthening of the body. Syrup is recommended for prevention of acute and chronic infectious and inflammatory diseases, respiratory viral diseases, reducing negative impact on the body of radioactive radiation, during prolonged treatment with antibiotics.

Syrup "Immune" (TU 15.8-30590731-019.2011) – a complex of plants classified as medicines is used in the formal, traditional medicine Ukraine and other countries. The structure consists of rose syrup, elder, rowan, echinacea. The syrup contains a set of biologically active compounds that contribute dezintoxic, antiseptic and immunostimulatory effects. It is used to improve the body's resistance to adverse environmental factors, prevention of vitamin deficiencies, as a fortifying agent in acute and chronic infections, malnutrition, physical activity, flu, to prevent respiratory and viral diseases.

In this context, **the aim** of this study was to investigate the possibility of using herba immunel syrups "Immune" and "Echinacea" as prescription constituents in sweet technology skimmed yogurt.

**Materials and methods.** Experimental studies were conducted in the laboratory department of technology of milk and milk products Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies named after S. Gzhyskyj and PAS "Galicia".

Production of sweet fat-free yogurt is used with a sweet additions syrups special purpose "Immune" and "Echinacea" carried reservoir method, with a sour normalized mixture with constant stirring syrups added "Immune" and "Echinacea".

There were held two series of studies. In the first series we examined the applicability of the proposed phytosyrup the production of yogurt, the second developed his industrial recipes.

As a result of experimental studies found the best recipe yogurt with proposed phytosyrup immune direction (respectively 10% syrup "Immune" and 9% for syrup "Echinacea"). Developed recipes are listed and submitted for industrial production (at a rate of 1,000 kg of finished product excluding production losses).

In parallel, we studied organoleptic, technological, biological and commodity properties, safety skimmed yogurt with sweet syrups "Echinacea" and "Immune".

**Results and discussion.** As a result of our experiments we found optimal yogurt recipes with the proposed phytosyrup immune orientation. Table 1 shows the recommended recipe for yogurt (fat mass fraction of 1%) of phytosyrup "Immune" and "Echinacea".

**Table 1.** Recommended recipes for yogurt (m.p. of f. 1%) of the phytosyrups "Immune" and "Echinacea"

The components of the recipe	Kinds of low-fat yogurt		
	low-fat yogurt (1 % m.p.of f.) without phytosyrup	low-fat yogurt with syrup "Immune"	low-fat yogurt with syrup "Echinacea"
Whole milk (3.4 %)	285,13	286,57	285,46
Skimmed milk (0.05%)	601,77	500,33	511,40
Low-fat milk powder (100% solubility)	30,0	30,0	30,0
Hamulsion SM	4,0	4,0	4,0
Hamulsion RKN	9,0	9,0	9,0
Pasteurized water	70,0	70,0	70,0
Sourdough of direct introduction	0,1	0,1	0,1
Phytosyrup "Immune"	–	100	–
Phytosyrup "Echinacea"	–	–	90
Total	1000	1000	1000

Analysis of digital material shows that the type phytosyrup significantly affect its compounding amount of (respectively 10% syrup "Immune" and 9% for syrup "Echinacea"). A smaller number of prescription phytosyrup "Echinacea" due to the influence of the latter, more specific the smell and taste caused by it available components.

We also studied the organoleptic, technological, biological and commodity properties, safety skimmed yogurt with sweet syrups "Echinacea" and "Immune".

Table 2 shows organoleptic sweet yogurt (m.p. of f. 1%) using a sweet fillings of phytosyrup "Immune" and "Echinacea" and the basic manufactured at the plant.

**Table 2.** Organoleptic yogurt with added phytosyrups "Immune" and "Echinacea"

Indicator	Regulatory Requirements	Prototypes yogurt (m.p of f. 1 %)	
		syrup "Immune"	syrup "Echinacea"
Appearance and texture	Homogeneous, with impaired clot for drinking, with the presence of small pieces of fruits and berries	Homogeneous, without impurities, slightly watery	Homogeneous, slightly watery, without impurities
Taste and smell	Milk, without the tastes and smells of the appropriate taste and aroma made excipients or flavorings as sweet	The scent of wild rose; sweet taste with a touch of filler	Clean, fresh smell, taste slightly sweet, sour milk, with a taste of echinacea
Colour	Milky-white colour caused by introduced filler (in the manufacture of fruit fillings, uniform throughout the mass)	Homogeneous, uniform throughout the mass with a light cream colour	Cream homogeneous, uniform throughout the mass

The organoleptic characteristics of the data show that the prototypes had a yoghurt regulations organoleptic characteristics: homogeneous, slightly watery, creamy consistency, without lumps and grains, possession of yogurt with fresh scent with a slight taste of addition (flavor hips and echinacea). Prototypes of sweet yogurt are characterized by white, cream or slightly creamy, homogeneous throughout the mass.

It should also be noted that the suggested types of yogurt characterized by a high content of vitamins. Analysis of amino acid composition showed the changes in the ratio of individual groups and individual amino acids in the application of the proposed syrups. This indicates an increase in biological activity of prototypes.

Conducted tastings have shown high taste and mer-

chandising characteristics prototypes.

Thus, the results of complex studies, recommended herbal syrups special purpose "Immune" and "Echinacea" as sweet fillings in the technology lowered fat yogurt to expand domestic production range of health care areas. Patents were granted.

It should be noted that the use of syrups immune destination "Immune" and "Echinacea" yogurt in technology does not require the use of additional process equipment.

**Conclusions.** Thus, the technology of manufacturing yogurt using phytosyrup "Immune" and "Echinacea". As a result of experiments established the best yogurt recipes with the proposed phytosyrup immune direction (respectively 10%for syrup "Immune" and 9% for syrup "Echinacea").



#### REFERENCES

- [1] Kaprelyants, L.V. Functional Foods: monogr. / L.V. Kaprelyants, K.H. Iorhachova. – Odesa: Druk, 2003. – 312 p.
- [2] Musul'manova, M.M. Milky-plant Combined Products / M.M. Musul'manova // Milk industry. – 2006. – № 5. – P. 72-73.
- [3] Osypova, L.A. Scientific-practical ground and development of technology of canned fruit beverages: dis. ... dr. tech. sc. : 05.18.13 / L.A. Osypova. – Odessa, 2007. – 377 p.
- [4] Pavlyuk, R.Yu. Biotechnology dairy beverages using buttermilk and additives with spicy vegetables / R.Yu. Pavlyuk, V.V. Pohars'ka, A.V. Khomenko, K.V. Kostrova // East European Journal of advanced technologies. – 2013. – № 10 (64), Vol. 4. – P. 53-57.
- [5] Pavlyuk, R.Yu. Innovative Technologies of vitamin fruit berry ice cream using frozen fine additives from vegetable raw materials / R.Yu. Pavlyuk, V.V. Pohars'ka, A.A. Berestova // East European Journal of advanced technologies. – 2013. – № 10 (64), Vol. 4. – P. 57-62.
- [6] Pavlyuk, R.Yu. The new generation of dairy products in improving immunity / R.Yu. Pavlyuk // Progressive resource saving technologies and their economic rationale for enterprises of a food. Economic problems of trade: Coll. sc. papers of KHDUKHT. – 2003. – Part 1. – P. 93-99.
- [7] Pavlyuk, R.Yu. Development of functional health of nano-beverages based on whey / R.Yu. Pavlyuk, V.V. Poharskaya, T.S. Abramova, A.A. Berestovaya, S.M. Loseva // East European Journal of advanced technologies. – 2014. – 6/10 (72). – P. 59-64.
- [8] Pavlyuk, R.Yu. Development of functional health ice cream using nanostrukturnal kriopast of fruit and vegetable raw materials with a record containing BAA / R.Yu. Pavlyuk et al // Progressive technique and technology of food production and trade of restaurants: Coll. sc. papers of KHDUKHT. – 2009. – P. 52-59.
- [9] Pohars'ka, V.V. New vitamin supplements BAA with chlorine-filicapacity vegetables and melted cheese on them / V.V. Pohars'ka, R.Yu. Pavlyuk, N.V. Yevtushenko, L.M. Sokolova // Progressive resource saving technologies and their economic rationale for enterprises of a food. Economic problems of trade: Coll. sc. papers. – Kharkiv: KHDUKHT, 2003. – Part 1 – P. 118-123.
- [10] Poharskaya, V.V. New additions of antioxidations from medical and spicy aromatic raw materials / V.V. Poharskaya, O.H. Ayda, E.V. Ryzhkova, T.V. Kryachko, N.V. Evtushenko // Abstracts of the Third International Scientific-Practic. Conf. "Science and social problems of society: medicine, pharmacy, biotechnology". – Kharkiv: NfaU, 2003. – Part. II. – P. 280.
- [11] Serheev, V.N. Biology active plant raw materials in food industry / V.N. Serheev, Yu.I. Kokaev // Food industry. – 2001. – № 6. – P. 28-30.
- [12] Tamyn, A. Yogurts and other milk products. Trans. from English / A. Tamyn, R. Robynson. – M., 2002. – 720 p.
- [13] Tutel'yan V.A. Nutrition and health / V.A. Tutel'yan // Food industry. – 2004. – № 5. – P. 6-7.
- [14] Zurera-Cosano, G. Effect of processing on contents and relationships of mineral elements of milk / G. Zurera-Cosano, R. Moreno-Rojas, M.A. Amaro-Lopez // Food Chem. – 1994. – Vol. 51. – P. 75-78.

## Vulnerability Analysis for Dynamic Investment Management

N. Lukova-Chuiko, R. Prus\*

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

\*Corresponding author. E-mail: ruslana\_prus@meta.ua

Paper received 17.04.15; Revised 23.04.15; Accepted for publication 16.05.15.

**Abstract.** The paper presents analysis of mathematical model and methodology of determining the optimal investment allocation between the objects of information security. The model allows to evaluate the potential losses decrease as a result of decision about investment allocation between information security objects. To predict the effectiveness of countermeasures and evaluate its work the model takes into account the vulnerability of objects to a security breach and potential loss due to such breach. Vulnerability function depends on the size of investment of both sides, can describe various systems, and includes the parameters that enable to identify the areas of greatest economic expediency of investment in complex information security systems. To coordinate the process of decision-making developed methodology of dynamic investment management. The main point of methodology is investment allocation conducted after identifying attacker's ways of threat realization. A dynamic confrontation is demonstrated on the system consisting of two objects. Analytical modeling of the process of defence and attack on the information security objects demonstrates that the methodology by taking into account attacker actions and vulnerability function raises investment usage efficiency and enables to assess the outcome of decisions.

**Keywords:** IT security, mathematical model, vulnerability, security breach, optimal security investment

**Introduction.** Nowadays, when cyberwar became real, the issue of information security attracts more and more attention. Still decisions about the respective defence measures are mostly taken based on heuristics and experience and often subjective. Also because of lack of resources information security became a matter of economic incentives for risk management. Optimal deployment of investment in information security system allows to improve the level of information security and can help to reason whether some security measures are worth its cost [1,2]. In order to achieve this kind of functionality, methodology of dynamic investment management based on game-theoretic model is proposed [6].

**The purpose of research** was to analyse the impact of potential decisions made by attackers and defenders and respective effect on variation of system indices and characteristics. Analysis enables to estimate potential losses due to security breaches.

**Materials and methods.** Developed approach is focused on decision-making about information security system improvement by optimal investment allocation. Decision-making is the process of choosing most preferable option from the set of acceptable options. The problem is solving on the basis of knowledge about security system, all the processes taking place in the system and could happen in near future, also on the basis of calculated decision efficiency and quality indices. Therefore adequate model of the process of decision-making results implementation is needed. To run the analytic modeling of the process of defence and attack on the information security objects game-theoretic model of dynamic investment management is used. The model not only takes into consideration attacker actions but also makes it possible to assess the consequences of decisions, to prognose the value of potential losses and to choose that option that guarantees expected losses due to security breaches to be minimal in most adverse conditions.

Selection and justification of mathematical models play a key role in the study of information confrontation. Conventional image that creates a model must satisfy two conflicting requirements: in the greatest extent reflects the properties of the objects, their relationships and situations that arise in various forms of opposition, and at the same

time avoids unnecessary complications, which can lead to significant computational challenges. While it is important to adhere to the system approach which in the problems of information security is manifested in the fact that the system "attack-defence" is seen in the interaction of its components according to their parameters and characteristics. Definition of these variables in the dynamic mode is complicated by a number of reasons. Primarily, it is the uncertainty of the conditions confronting, i.e. the impossibility of accurately predicting the intentions, capabilities and activities of the opponent, which is largely due to the lack of statistical data. Difficulties arise even in determining the parameters and characteristics of its own information system, for example, such an important indicator as vulnerability objects.

In order to estimate the optimal option of investment allocation between information security objects the function that measures the potential losses due to realization of threats is used [3]:

$$i(x, y) = \sum_{k=1}^l i_k(x, y) = \sum_{k=1}^l g_k f_k(x_k, y_k) \quad (1)$$

where  $k = \overline{1, l}$ : object number;  $x_k$ : attacker investment to breach the system and information security investment to protect from that breach, respectively,

$\sum_{k=1}^l x_k = X$ ,  $x_k \geq 0$ ,  $\sum_{k=1}^l y_k = Y$ ,  $y_k \geq 0$ ;  $g_k$ : information value;  $\sum_{k=1}^l g_k = 1$ ;  $f_k(x_k, y_k)$ : object vulnerability function of attacker-defender investment ratio.

Proposed model allows to evaluate the potential losses decrease as a result of decision about investment allocation between information security objects. As the result of alternating decision-making consequences modeling in dynamic mode optimal set of decision by both subjects, that in Game Theory present Nash equilibrium, is obtained.

Vulnerability function of objects, depending on the size of investment of both sides and can describe various systems, is used in modeling. Vulnerability functions include the parameters that enable to identify the areas of greatest economic expediency of costs in complex sys-

tems of information protection that allows to increase the efficiency of investments [4, 7].

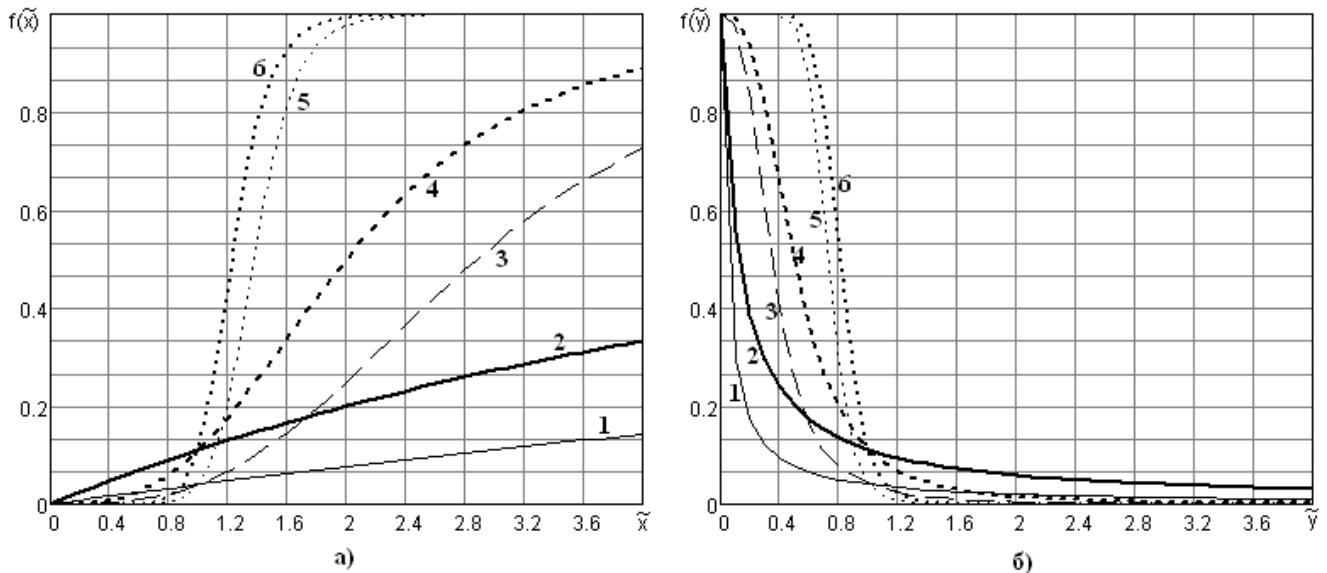
Most crucial part of the modeling is vulnerability function estimating. It is denoted that with increasing security investments it is possible to decrease the vulnerability level and with increasing attacker investments it is possible to increase the vulnerability level. Therefore variables  $x_k$ ,  $y_k$  in function  $f_k(x_k, y_k)$  expressed as  $x/y$  relation.

Also by security investing larger and larger amounts it is possible to make the attack probability arbitrarily small:

$x/y \rightarrow 0 \quad f(x, y) \rightarrow 0$  and vice versa:  $x/y \rightarrow \infty \quad f(x, y) \rightarrow 1$ . Under existing conditions next function may be used:

$$f(x, y) = \frac{\left(\frac{x}{y}\right)^n}{\left(\frac{x}{y}\right)^n + c} \quad (2)$$

where parameters  $n$ ,  $c$  differ for various security measures (Fig.1).

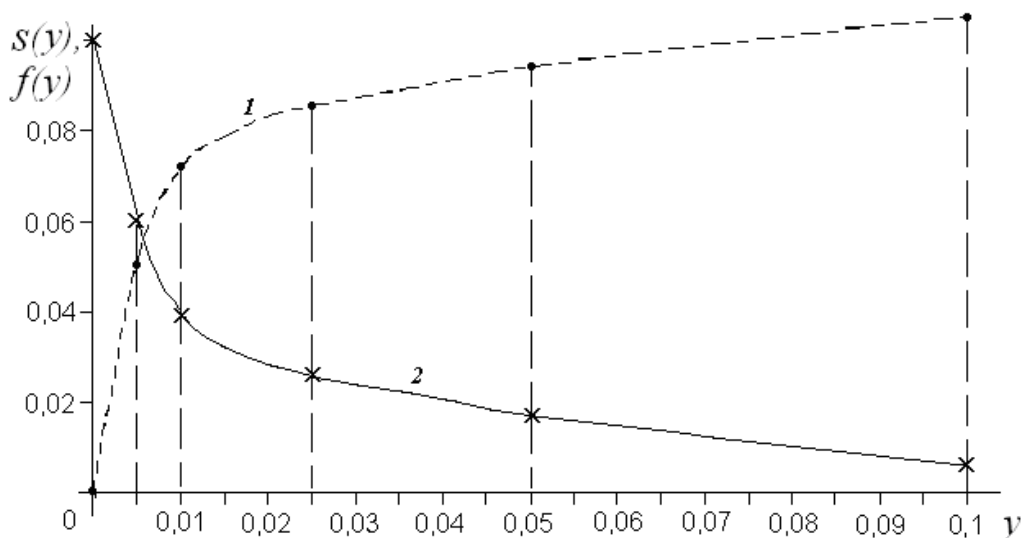


**Figure 1.** Vulnerability functions: a) dependence on  $x$  ( $y = \text{const}$ ); б) dependence on  $y$ , ( $x = \text{const}$ ) with various  $n$  and  $c$ : traces 1,2 –  $n=1$ , 3,4 –  $n=3$ , 5,6 –  $n=10$ , traces 1,3,5 –  $c=24$ , 2,4,6 –  $c=8$

Linear-fractional ( $n=1$ ) functions (2) represents information vulnerability of material information carrier. For such a class of functions insignificant increasing of security investments cause gradual small decreasing of the vulnerability level. Nonlinear-fractional ( $n>1$ ) functions represent properties of information in computer systems. In this case for successful breach attacker needs substantial investments. With increasing of nonlinearity regard-

ing factor  $n$  function  $f(x, y)$  becomes step curve. This relation occurs in encryption: for successful breach attacker applies substantial investments, as a result potential losses due to realization of threats rise unevenly.

As example of determining parameters  $n$  and  $c$  results of reliability network system modeling were used [5]. On fig. 2 trace 1 represents reliability, trace 2 – vulnerability (assuming both characteristics are opposite).



**Figure 2.** System reliability  $S(y)$  (trace 1) and system vulnerability  $f(y)$  (trace 2),  $y$  – expressed in per cent to  $g$

Curve shape indicates that vulnerability can be approximated by function (2) with  $n=1$ . Parameter  $c$  was found by calculating  $c_i$  for every reference point and averaging these values minimizing total deviation. By computing value  $c = 1500$  vulnerability function can be built:

$$f(y) = \frac{1}{1+1500y}$$

Although vulnerability function in this example was generated, for every particular element of the information security system function must be built using reliable empirical data which are limited. To gather data on information security incidents and analyse them regular monitoring of events and incidents must be provided. Also the majority of organizations might not disclose the information security incidents even if the data exists.

The vulnerability of computers, servers, networks, network equipment and software are detected, identified and classified during analysis. Analysis of vulnerabilities enables to predict the effectiveness of countermeasures and evaluate their work. It is created a database that contains all the necessary information for the verification of the system for the presence of gaps in the security system, anomalies in the network, and potential ways of penetration into the system through the software flaws.

System analysis of vulnerabilities is effective if the conditions are met:

- information about new vulnerabilities is constantly updating;
- while identifying of vulnerabilities the number of false positive results is less than the acceptable value;
- ability to check multiple systems simultaneously;
- results of inspections are presented in consistent, clear and understandable reports;
- recommendations for countermeasures to eliminate vulnerabilities are given.

The analysis of vulnerabilities consists of the following steps:

- identification and classification of site networks or systems;
- evaluation of the importance of each object;
- determination of potential threats, sources of their origin (at this stage the system is exposed to deliberate attacks to identify vulnerabilities);
- developing of the plan to fight off the most dangerous threats in the first place;
- implementation of measures to minimize damage caused by threats.

In order to conduct effective analysis of vulnerabilities security monitoring is held. Attention focuses on the most critical objects and it is enhanced of countermeasures to prevent the occurrence of threats. Investigation of the information security incidents is also conducted.

As much as credible vulnerability function will be built, as easier it will be to coordinate countermeasures against threats to lower the vulnerability. It is also critical in the aspect of rapid evolvement of threats to information system. Recently, many attackers to guarantee successful breach conduct espionage. Usually with growing awareness of system details intruder might redirect his attacks which might be followed by relocation of investments. Such actions must be answered by relocation of infor-

mation security investments, respectively. To coordinate the process of decision-making under these conditions developed methodology of dynamic investment management. The main point of methodology is investment allocation is conducted after identifying attacker's ways of threat realization.

A dynamic confrontation is demonstrated on the system consisting of two objects (Fig. 3) characterized by different vulnerability functions and which vary in information value.

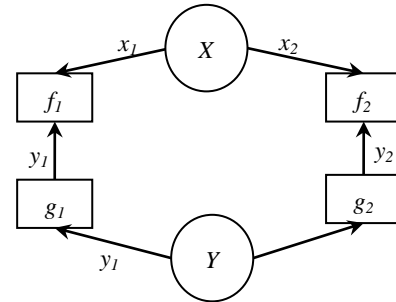


Figure 3. Security system scheme

Using game-theoretic regulations ensures that optimal decision about investment allocation will guarantee minimal potential losses under any most unfavourable actions of the attacker. Combining this with taking into account vulnerability function methodology reveals how investments in information security countermeasures influence the potential losses due to realization of threats. By using this methodology outcome of the optimal decision in unsettled conditions can be estimated.

Within the framework of methodology process of making moves in turn by attacker and defender is modeling (Fig. 4). It is assumed each of them knows investment allocation of his adversary after previous move and relying on this knowledge redirects his investments. Every decision is made by using objective function (1) and minimax criterion for defender or maximin criterion for attacker. Defender stops the process if next move is disadvantageous.

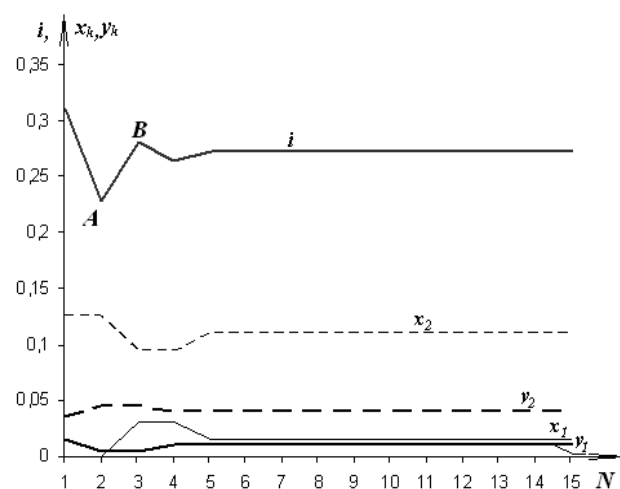


Figure 4. Dynamic confrontation of defender and attacker:

$$g_1=0,3; g_2=0,7;$$

$$f_1(x, y) = \frac{x/y}{x/y + 8}; \quad f_2(x, y) = \frac{\left(\frac{x}{y}\right)^2}{\left(\frac{x}{y}\right)^2 + 16}$$

Search for optimal information security investment allocation  $\{y_k^0\}$  which guarantee minimal potential losses due to realization of threats with initialized attacker and defender investments  $\sum_{k=1}^l x_k = X$  and  $\sum_{k=1}^l y_k = Y$ , respectively, is conducted in next sequence:

1. Information security investment allocation  $\{y_k\}$  is initialized proportional to information value  $\{g_k\}$ .
2. Vulnerability functions (2) with appropriate parameters  $n$  and  $c$  are generated.
3. Values of objective function (1) for each option of attacker's investment allocation  $\{x_k\}$  are calculated.
4. Using Bellman's method optimal attacker investment allocation  $\{x_k\}$  for initialized investment allocation  $\{y_k\}$  by maximizing potential losses  $i(x)$  is found.
5. Considering attacker investment allocation  $\{x_k\}$  found on previous step defender investment allocation  $\{y_k\}$  by minimizing potential losses  $i(y)$  is adjusted.
6. Described procedure (steps 4-5) is repeating until  $\max i(x)$  reaches its minimal value (Fig. 4). Consistent with criterion defender investment allocation  $\{y_k^0\}$  is considered optimal.

**Results and their discussion.** Results of analyzing Fig. 4 follow. With total sum of investments ratio  $X/Y = 2,5$  on first steps close to oscillating process, that describes redirecting of entire each side's investments from one object to another, takes place. It is often explained by limitation of attacker investments. In order to succeed in system breach for attacker more appropriate decision is to concentrate entire investments on the one object than to allocate them to several objects.

Defender keeps track of possible actions of the attacker and directs information security investments at the attacked object. Notched line  $i(n)$  on Fig. 4 shows that each step of the attacker raise the potential losses (point B) and each defender's step lower them (point A). Also on the second step ( $N = 2$ ) all the defender's investments concentrated on the second more valuable object. On the next step ( $N = 3$ ) rational attacker, assuming he improved his knowledge from outcome of the previous decision, to the second more protected object allocates less investments due to the lack of them. As countermeasure on the fourth step ( $N = 4$ ) defender increases amount of investments in the first object security. Such defender's investment allocation ( $y_1^0 = 0,01$ ;  $y_2^0 = 0,04$ ) is optimal since together with attacker's decision ( $x_1^0 = 0,015$ ;  $x_2^0 = 0,11$ ) on the next step satisfies the requirements of the saddle point. Potential losses due to realization of threats equal  $i = 0,166$ . Any deviation from optimal decision is unprofitable since it guarantees the best result for each side under any actions of the adversary.

For efficient appliance of the proposed model should be used a reliable system of monitoring mechanism of information security incidents and alert mechanism of attack. Application of a reliable system of monitoring information security incidents and attacks notification mechanism reduces uncertainty and improves the accuracy of calculations, since it furthers the proper selection constraints and decision criteria, correct formation of the acceptable alternatives set, and proper evaluation of system parameters and characteristics, which increases the efficiency of the decision.

Monitoring of incidents, which include gathering, processing, transmission and analysis of data about the system, becomes the key element in justifying decisions. The primary task of monitoring is timely identification of the incident, its analysis and quick response.

The introduction of new ways of identification of events as deviations from the norm will help confirm the presence of incidents and timely and promptly respond to them and in some cases prevent attacks from intruders.

Incident response process can be organized as follows:

- 1) defining of information security incident, creating a list of events that classified as incidents;
- 2) notification of responsible person about the incident;
- 3) eliminating of the consequences and causes of the incident;
- 4) procedure for investigating the incident (determining of the causes of incident, the procedure for collecting and preserving evidences);
- 5) implementation of rehabilitative and preventive actions based on the results of the modelling of the process of defence and attack by using function (1).

**Conclusions.** Analytical modeling of the process of defence and attack on the information security objects demonstrates that this methodology of dynamic investment management by taking into consideration attacker actions raises investment usage efficiency and enables to assess the outcome of decisions, to prognose the value of potential losses and to choose that option that guarantees expected losses due to security breaches to be minimal under most unfavourable actions of the attacker.

Developed methodology provides reasonable results to support decision about optimal information security investment allocation between elements of information system, which differ in vulnerability, information value, and quantity of elements. By using vulnerability function methodology reveals how investments in information security countermeasures influence the potential losses and, at the same time, makes it possible to allocate investments to those elements of the system that minimize potential losses with highest efficiency of attack neutralization.

In order to fulfill effectively all these tasks, reliable monitoring system of information security events and incidents as much as mechanism for attacks alerting must be provided. Monitoring of information security incidents includes collecting, processing, signaling and analyzing data about system and becomes key point in decision-making process. On monitoring results depends how reliable input data such as vulnerability function, possible total amount of attacker's investments, and preferable ways of threat realization. At the same time, accuracy of the input data guarantees countermeasures to be operative, appropriate and quick.

#### REFERENCES

- [1] Anderson, R., Moore, T. The Economics of Information Security // Science. – 2006. – Vol. 314. – No. 5799. – P. 610-613.
- [2] Gordon, L.A., Loeb, M.P. The Economics of Information Security Investment // ACM Transactions on Information and System Security. – 2002. – Vol. 5. – No. 4. – P. 438-457.
- [3] Levchenko, E., Rabchun, A. Optimization Problems of Information Security Management // Modern Information Security. – No. 1. – P.16-23.
- [4] Levchenko, E., Prus, R., Rabchun, D. Economic Expedience Indices of Information Security Investment // Information Security. – 2012. – Vol. 18. – No. 2. – P. 6-11.
- [5] Moitra, S., Konda, S. A Simulation Model for Managing Survivability of Networked Information Systems // Technical Report CMU / SEI – 2000. – TR – 020, Dec. 2000.
- [6] Prus, R. Optimal Security Investment Allocation in Dynamic Mode // Information Security. – 2012. – Vol. 18. – No. 1. – P. 26-32.
- [7] Lui, W., Tanaka, H., Matsuura, K. Empirical-Analysis Methodology for Information Security Investment and its Application to a Reliable Survey of Japanese Firms // Information Proceeding of Japan Digital Courier. – 2007. – Vol. 3. – Sept. 2007. – P. 585-599.

## Features of structure changing of copper wires in terms of the complex action of current and high temperature

O.B. Nazarovets<sup>1\*</sup>, V.I. Gudym<sup>1,2</sup>, O.A. Kuzin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

<sup>2</sup>Crakow University of Technology, Krakow, Poland

<sup>3</sup>National University "Lviv Polytechnic", Lviv, Ukraine

\*Corresponding author. E-mail: nazarovets.oleg@gmail.com

Paper received 26.05.15; Revised 30.06.15; Accepted for publication 02.07.15.

**Abstract.** The article presents the results of researches changing the structure of copper wires internal electric networks under the action of electric and thermal loads. Described metallographic signs of short circuits in terms of the complex action of current and high temperature. On the basis of researches the features of the structure of electrical wires at different temperatures.

**Key words:** short circuit, fire, internal electric networks, microstructure wire

**Introduction.** According to the statistics of fires in Ukraine in recent years, almost 80% of all fires are occurred in residential sector. Among the main reasons of their occurrence, almost 20% of fires, depending on the year, are breach of fire safety rules while constructing and operating electrical installations [1].

However, in some cases conclusions about the involvement of elements of internal electrical networks to fires are not justified enough. This is due to different ways of laying wires and their ability to ignite the combustible elements of structure. Fire occurs when the flame appears after heating, which will be supported by the presence of a sufficient amount of oxidizer and combustible environment [2-3].

During the operation of electric networks, overheating of wires insulation is dangerous, which significantly accelerates the process of aging. [4].

**Problem.** The possible involvement of a short circuit (SC) to fire usually occurs when electrical wires with traces of melting are in burned areas. However, melting wires along with current of SC can also be caused by external heat influence. The form of melting and its location along the length of the wire are usually chosen like the criterion of difference between these types of melting by visual inspection.

**Purpose is** to develop and to propose methods to identify the implication of electrical installations to fires by identifying patterns of microstructure change of copper wires of internal electrical grids of residential and public buildings that were in the fire conditions.

**Materials and methods.** For achievement of the purpose of work, the researches of wires structures were

made in cases when their temperature was 19, 250, 300, 400, 600, 800, 950°C till the SC occurs. Researches of the wires structure were also made after the SC occurred in model fire.

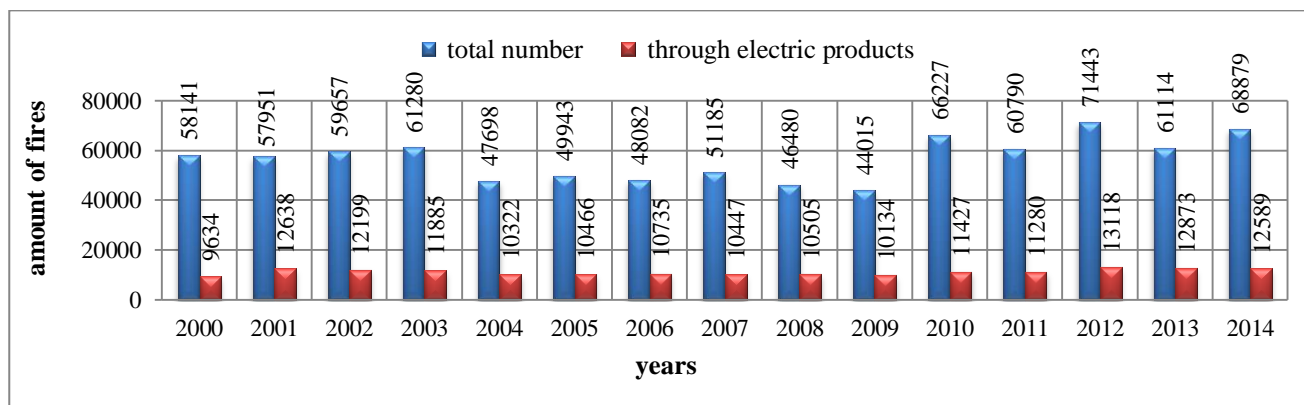
Copper wires with rubber and PVC insulation are used as part of internal electric networks in cross-sectional area of 1,5 and 2,5 mm<sup>2</sup>. Wires were at voltage of 220 V at different temperatures of environment. Heating was performed by using a muffle furnace and in open flame of model fire.

Performing experiments were conducted in the furnace for regimes that are listed in the Table 1.

**Table 1.** Terms of experiments in a muffle furnace

№	The temperature in the furnace T, °C	The residence time of the wire in the furnace before SC, τ min	The residence time of the wire in the furnace after SC τ, min
1.	19	15	–
2.	250	15	–
3.	250	15	20 and 60
4.	300	15	–
5.	300	15	20
6.	400	15	–
7.	400	15	20 and 60
8.	600	15	–
9.	600	15	20 and 60
10.	800	15	–
11.	800	15	20 and 60
12.	950	15	–
13.	950	15	20

The Class A model fire was created to study the patterns of wires after SC in open flame [5]. Insulated wires



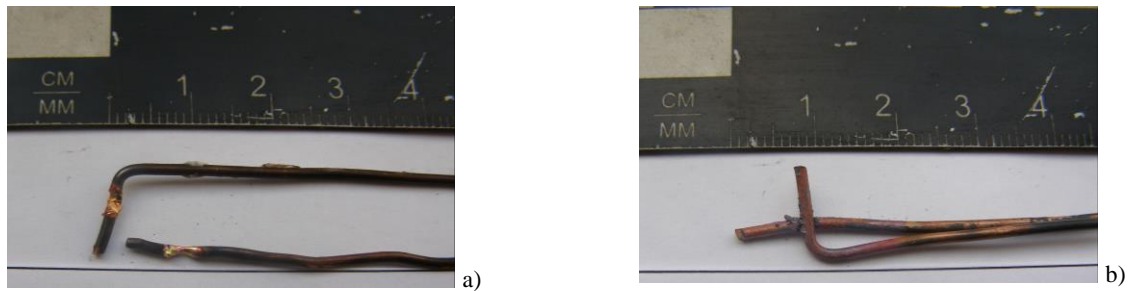
**Fig. 1.** Statistics of fires from 2000 to 2014

energized 220 V laid crosswise, SC arose at the time of combustion of isolation and contact wires. The temperature of the flame ranged 580-800°C in the combustion zone.

After the experiment, the areas wires with melting size

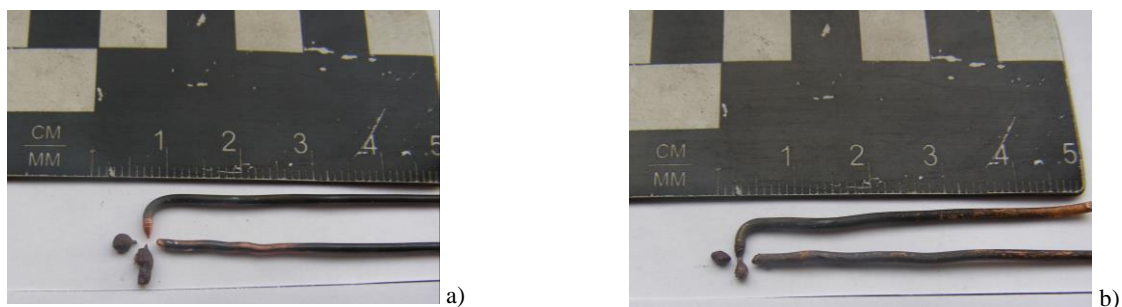
of 50-100 mm were withdrawn, which were produced thin sections for research on optical microscope.

**Results and discussion.** An analysis of wires after the study (Table. 1) showed that SC at 19°C does not cause metal spraying (fig. 2).



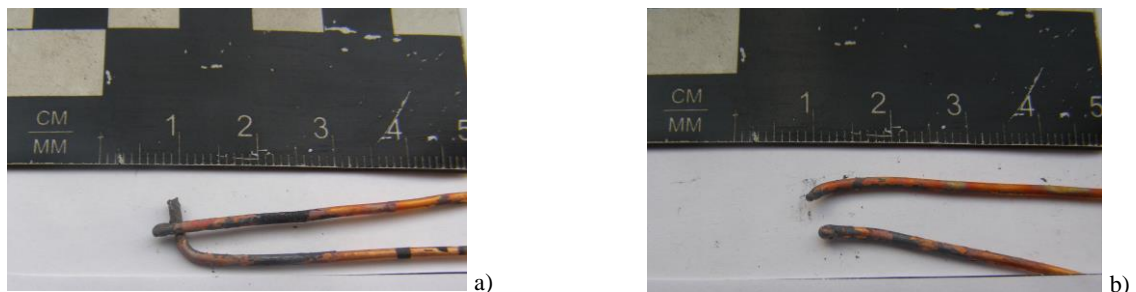
**Fig. 2.** Samples in which SC occurred at temperature 19°C: a) without conglutination; b) with conglutination

At the same time, the SC leads to metal spraying of wires at temperatures of 250 and 300°C (fig. 3).

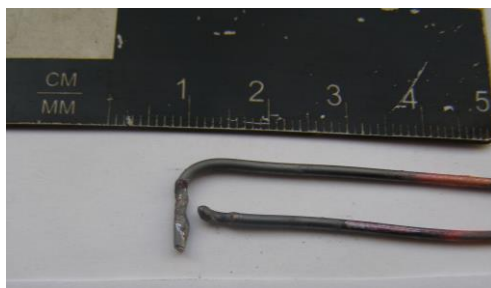


**Fig. 3.** Samples in which SC occurred at temperature: a) 250°C, 15 minutes to SC and removal from the furnace; b) 300°C, 15 minutes to SC and endurance of 20 minutes in the furnace

Studies of wires in which SC was set at 400 °C showed the absence of metal spraying after SC (fig. 4).



**Fig. 4.** Samples in which SC occurred at temperature 400°C: a) endurance of 20 minutes in the furnace; b) endurance of 60 minutes in the furnace;.



**Fig. 5.** Sample in which SC occurred at temperature 950°C 15 minutes to occurrence SC and removal from the furnace

After heating of wires to a temperature of 600, 800 and 950°C, SC is not accompanied by spraying, but it leads to substantial melting of the surface layers, as the presence of pits and areas indicates in which geometric parameters significantly different from the original form of wires (fig. 5).

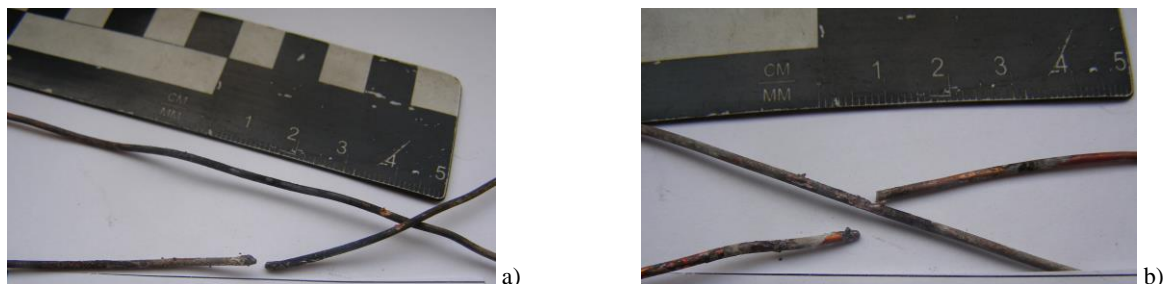
This change of parameters of SC zone is connected with the dynamics of oxidation of the surface layers and with

change of the mechanical properties of the wires material at increased temperature. Heating above 400°C leads to softening of metal (modulus of elasticity ( $E$ ) and ultimate tensile strength ( $\sigma_b$ ) are reduced) so spraying does not occur.

Thus studies have shown that the nature of SC zones can judge the temperature at which the destruction occurred. Short circuit at 19°C does not cause metal spraying of wires. Significant metal spraying was found during heating up to 250 and 300°C. When the temperature rises above 600°C, the fluidity of the metal is in terms of SC, as growth of change of the geometrical parameters of wires indicates.

Analysis of the samples in which the SC took place under conditions close to real (using the model fire) showed that burnout of wire is possible not only in the area of contact of wires but also beyond its bounds. This is due to the higher resistance in the SC zone due to the action of flame, as the formation of a layer of dark color indicates on the surface fracture (fig. 6).





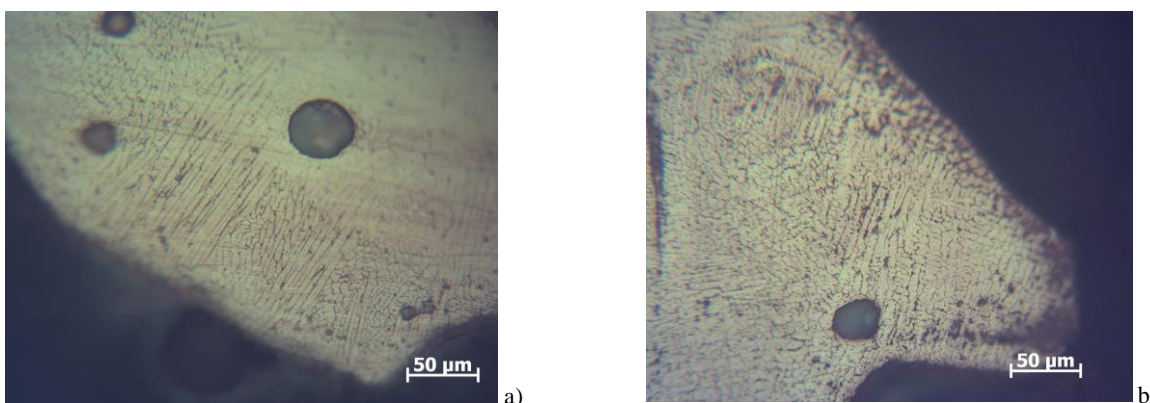
**Fig. 6.** Samples in which SC occurred as the result of damage of the insulation by flame

The study of micro sections confirms the results of macro analysis. The difference in geometrical characteristics of wiring increases with increasing temperature of SC.

Analysis of the microstructure of the material of wires that were studied in the SC zone at 19°C showed the formation of pores with a diameter of 50-200 microns. Moreover, the pores are formed at the surface of destruction of wire in the area of maximum overheating.

In wires that are heated to a temperature of 250°C areas of different colors are, including blue indicating the oxidation that occurs not only on the surface but also in the inner

layers of the material. During the SC pores are formed, mainly in the oxidation zone or on its border. It should be noted that cast structure appears after the SC at 250°C and endurance of 20 minutes in the furnace, characteristic of which is crystallites that grow in the direction inverse heat dissipation. And after endurance of 60 minutes in the furnace the crystallite size is bigger than the crystallites formed during endurance of 20 min (fig. 7). During the destruction of SC zone it is observed the exit of pores on the outer surface of the wire that shows up well after endurance of 60 minutes at a temperature of 250°C.

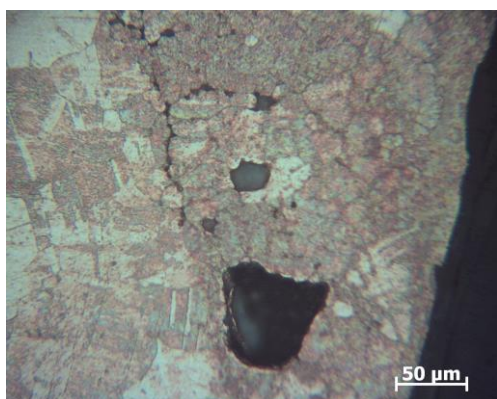


**Fig. 7.** Microstructure of wire in which SC was at temperature 250 °C: a) endurance of 20 minutes in the furnace;; b) endurance of 60 minutes in the furnace;.

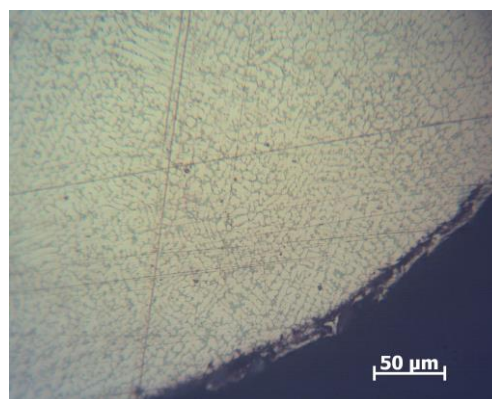
Researches of samples after heating to a temperature of 300°C confirmed the getting result. Number of pore by size of 10-200 microns dramatically increases during SC. And they come to the surface destruction. Short circuit at temperature 300°C is accompanied by destruction of material which mainly occurs in crystal boundaries of polycrystalline copper (fig. 8). So metal spraying are connected during SC with the fact that the destruction passes by crystal boundary.

Researches after heating to a temperature of 400°C show-

ed that a cast structure also is formed in the SC zone. During the destruction of wires, crystal damage and cracks are not observed as well as metal spraying does not occur. Size of dendrites is higher after endurance of 60 minutes in the furnace than after endurance of 20 minutes. Lack of spraying at 400°C is connected with the fact that the destruction does not pass by crystal boundaries during the SC but in the area of formation of the biggest thermal tension, and the cracks are between voids that are formed during melting of material (fig. 9).



**Fig. 8.** Microstructure of wire in which SC was at temperature 300 °C

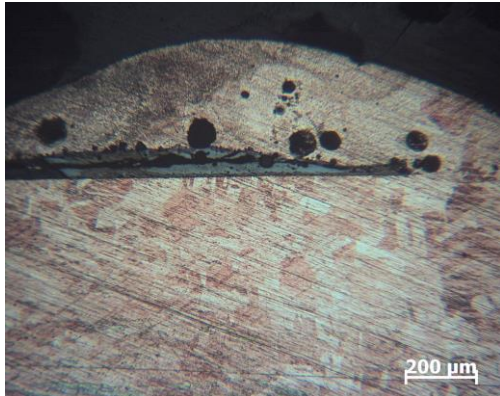


**Fig. 9.** Microstructure of wire in which SC was at 400 °C and endurance of 60 minutes in the furnace

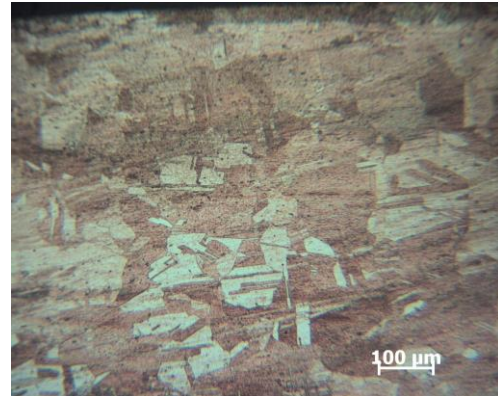
In the samples, pores and cracks are formed after SCs heated to a temperature of 600°C in the areas of the biggest thermal tensions. And the cracks are mainly on the maximum size of pores (fig. 10).

Heating to a temperature of 800°C is accompanied by significant oxidation of the metal as the presence of a component containing Cu<sub>2</sub>O indicates. The formation of cracks occurs in large pores in the area of thermal ten-

sions on the boundaries of separation of melted and not melted metal. It should be noted that metal spraying does not occur during the SC, but it is flowing. The zone of cracks formation is oxidized as its color indicates which is significantly different from the color of the base metal (fig. 11). Additional endurance of 20 min in the furnace after SC leads to significant oxidation of zones of melted and not melted metal.



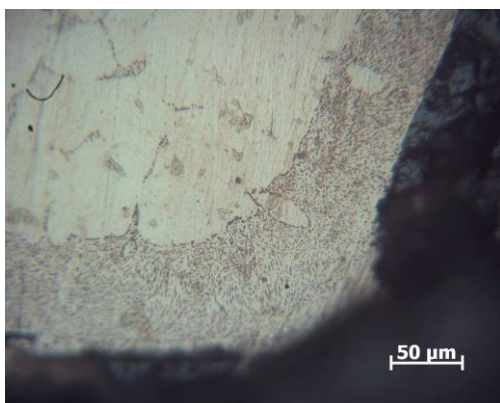
**Fig. 10.** Microstructure of wire in which SC was at temperature 600°C and endurance of 60 minutes in the furnace



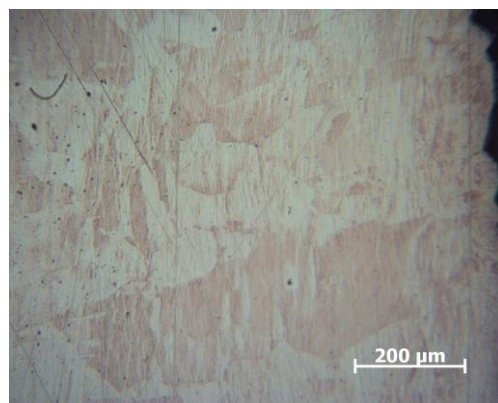
**Fig. 11.** Microstructure of wire in which SC was at 800°C and endurance of 20 minutes in the furnace

Zones of melted metal are formed after the SC during heating to a temperature of 950°C that is significantly different from the base metal zone (fig. 12). The selection of eutectic Cu-Cu<sub>2</sub>O is in the area of cast metal, which is placed along the length of the surface. The presence of pores is found only in certain places, and cracks are observed only in the field of metal flow in the area of SC. The nature of the damage indicates that the SC zone formed eutectic enriched

areas and areas chemical composition of which is different from the eutectic. Pores are formed in zones that significantly differ from the eutectic composition and shrinkage cracks are formed in eutectic zones. Increasing of endurance time at 950°C to 20 minutes is accompanied by increased thickness on the surface of oxidized material (fig. 13).



**Fig. 12.** Microstructure of wire in which SC was at temperature 950°C



**Fig. 13.** Microstructure of wire in which SC was at temperature 950°C and endurance of 20 minutes in the furnace

Analysis of the microstructure of the samples after SC in model fire showed that significant differences of the microstructure due to wires that are heated in the furnace were not found.

Considering that the flame has a temperature, which varies from 300–1200°C [6] for accurate analysis of the influence of temperature on the microstructure after SC it is enough to conduct researches using a muffle furnace.

**Conclusions.** Based on the researches it is found:

In terms of SC of copper wires, formation of cast structure is observed over the entire range of investigated temperatures.

Fracture of the metal at the SC depends on the temperature of the wire. Spraying is observed at the temperature of 250 and 300°C, which is connected with the formation of crystal damage and cracks under the tension arising from the evaporation of material in local micro volumes.

Spraying of metal does not occur during SC at temperatures of 19°C and above 400°C. The absence of metal spraying at temperatures above 400°C is connected with its mitigating and its corresponding change elastic modulus ( $E$ ) and ultimate tensile strength ( $\sigma_e$ ). With increasing temperature of SC the difference of geometric parameters of wires becomes bigger.

#### REFERENCES

- [1] The official website of the Ukrainian Research Institute of Civil Protection: [http://www.undicz.mns.gov.ua/content// Statistics Section / Analysis of array of cards of the account of fires](http://www.undicz.mns.gov.ua/content//Statistics%20Section/Analysis%20of%20array%20of%20cards%20of%20the%20account%20of%20fires/) / URL: <http://www.undicz.mns.gov.ua/content/amkop.html>.
- [2] Gudym, V.I. Analysis of the state and causes of fires of electrical origin in the domestic sector / V.I. Gudym, O.B. Nazarovets, O.A. Kuzin // Fire safety: Coll. Science work. – #22. – Lviv, SPOLOM, 2013. – P. 55-60.
- [3] Gudym, V.I. Analysis of microstructure of copper cable-wire products of electrical networks that were in fire / V.I. Gudym, M. Karbonickek, O.B. Nazarovets // Fire safety: Coll. Science work. – №20. – Lviv, SPOLOM, 2012. – P. 144-149.
- [4] Gudym, V.I. Mathematical modeling of the processes of heating wires of internal electrical networks of residential and public buildings / V.I. Gudym, B.M. Yurkiv, O.B. Nazarovets // Fire safety: Coll. Science work № 26 - Lviv, SPOLOM, 2015. – P. 59-64.
- [5] GOST 3675-98 "Fire trucks. Fire extinguisher. General technical requirements and test methods"
- [6] Demydov, P.H. Burning and the properties of flammable substances / P.H. Demidov, V.A. Shandyba, P.P. Shcheglov. – M.: Chemistry, 1981. – 272 p.

## The concept of construction an automatic system for ATC emotional condition monitoring

V. Temnikov\*, A. Peteichuk

National Aviation University, Kiev, Ukraine

\*Corresponding author. E-mail: temnikov\_v@ukr.net

Paper received 26.05.15; Revised 30.06.15; Accepted for publication 03.07.15.

**Abstract.** One of the most important problems currently connected with providing of persons automated control access to the resources of information systems by voice is permanent access control of air traffic controllers (ATC) to information resources of aviation ergonomics systems that is executed during operations. It is related because the safety of aircraft depends of the reasonableness and correctness of ATC actions. The possible inadvertencies during their work can be connected with a constant feeling of neuro-emotional stress that is caused by increased responsibility for the decisions taking, lack of time and a large amount of controlled processes. This leads to increasing urgency of permanent monitoring of the emotional condition (EC) controllers. Special criterions of EC monitoring systems usage during controlling their access to information resources of ergonomics systems is small distances from the sound source to EC monitoring systems, small amount of controlled entities and necessity of control ensuring in the real time. Mentioned features of usage are determine requirements for the presentation of systems performance. Other important requirement is necessity of monitoring by ATC continuous speech. The aim of the current research was to develop a concept of construction of EC monitoring system for ATC, which is provide the execution of presented to system requirements and having high qualitative indexes. In accordance with developed concept the EC monitoring of ATC by means of continuous speech is reduced to keyword monitoring which are extracted from smooth continuous ATC speech and based on a comparative analysis of the control and reference informative parameters characterizing the isolated (primarily vowels) phonemes. The article briefly describes a method for increasing the performance of the search subsystem and key words extracting in continuous ATC speech.

**Keywords:** Air traffic controller, emotional condition, speech recognition, pitches frequency, formants, phoneme

### Introduction

One of the most important problems currently connected with providing of persons automated control access to the resources of information systems by voice is permanent access control of air traffic controllers (ATC) to information resources of aviation ergonomics systems that is executed during operations.

Currently, on the ATC work a visual inspection is made by the Senior ATC. It is clearly insufficient.

For the reducing of the influence of human factors on the aviation safety the authors propose performing of permanent remote automatic EC monitoring of an ATC during its operation [4,5,7].

The EC monitoring is performed in the real time and allows preventing access to information resources for ATC which are in inappropriate EC.

As a biometric criteria of ATC for the monitoring realization proposed to utilize its voice.

The aim of the current research was to develop a concept of construction of EC monitoring system for ATC, which is provide the execution of presented to system requirements and having high qualitative indexes. The present disclosure contains the concept development results.

Special criterions of EC monitoring systems usage during controlling their access to information resources of ergonomics systems are small distances from the sound source to EC monitoring systems, small amount of controlled entities and necessity of control ensuring in the real time.

Mentioned features of usage are determine requirements for the presentation of systems performance. Other important requirement is necessity of monitoring by ATC continuous speech. Another important factor is necessity of monitoring of continuous ATC speech. Marked that the provision of this requirement is facilitated by such specific requirements for the ATC as the necessity to use a special phraseology ensuring moderation of speech and fixed

distance between the sound source and the microphone.

In the current paper are presented the basic principles and algorithm for the realization of the automatic remote EC monitoring, and disclosed the work of basic subsystems EC monitoring system which is developed by means of ATC work specifics:

1. An ATC during the audio exchange with the aircraft crew members uses the professional phraseology set.
2. An ATC and the aircraft crew members leads the alternately information exchange.
3. The ATC speech has to be measured with clear and concise words pronouncing.

The specific feature that is peculiar to ATC is stress tolerance as a result of special psychological training. Moreover, ATC has to be completely healthy.

Problems to be solved by developed EC monitoring system:

1. The administrator assisting (means the Senior ATC), which is provide the visual management for ATC activities, to prevent access to information resources of persons, whose occupy an ATC workplace unauthorized and whose are in inappropriate EC, by the signal when detects a possible violation (which is especially important during standalone ATC work).
2. The EC changes tracking during ATC operation.
3. Obtaining of the documentary violation evidence during the accidents causes investigation, emergency and flight accidents.

### The basic principles and algorithm of the remote monitoring of the EC of ATC

1. Control is performed by means of smooth continuous speech that is based on analysis of speech signal parameters, fixing during the audio exchange between the ATC and aircraft crew members.
2. The EC monitoring on the continuous speech is reduced to its implementation by means of speech fragments extracted from ATC continuous speech. Under the speech

fragments means words and phrases that is often used by ATC during the operation, including a part of professional phraseology. (for the ATC professional phraseology is established by normative documents).

3. The EC monitoring is based on methods of pattern recognition theory [2] using the developed system of speech signal parameters.

The developed algorithm for EC monitoring that is based on abovementioned principles includes the following steps:

- scanning and discretization of the speech signal;
- pre-processing, which consists in noise reduction;
- the continuous speech segmentation on speech fragments (words or phrases);
- "key" speech fragments (words, phrases) searching in continuous speech and their allocation;
- EC determination of ATC on the dedicated speech fragments (during the monitoring process implement the speech signals parameterization and classification).

Phoneme segmentation is offered, as well as noise reduction, performed using wavelets [1,3,6]. Segmentation problem by means of wavelets solving thought interphoneme transitions detecting in which the signal undergoes significant changes at multiple scales studies and consequently characterized by an increase in the wavelet coefficients for many levels of detailing, while the stationary portions phonemes wavelet coefficients are grouped near certain scale. Searching of interphoneme borders is reduced to finding moments of wavelet coefficients increasing at a significant amount zoom levels. The significant is the selection of wavelet basis, which should allows describing fixed speech signal with the relatively small amount of non-zero coefficients. Appropriate for the problem solving as wavelet basis used Haar wavelets, Daubechies 5 or 6.

Below is briefly reviewed work of the main subsystems of the EC monitoring developed system (speech fragments allocation from the smooth continuous speech subsystem and EC monitoring subsystem by means of allocated speech fragments), constructed based on mentioned principles and algorithm.

### **Construction of EC monitoring subsystem of ATC by the speech fragments extracted from the smooth continuous speech**

The EC monitoring is based on the phonemes analysis of speech fragments that is extracted from the smooth continuous ATC speech.

The main subsystem steps are: keyword segmentation into phonemes, recognizing phonemes, parameterization vowel phonemes, classification of speech signals and a decision about EC of controller.

During the work performing the observations have been conducting, the essence of which was to analyze the different parameters, that characterize the speech fragments of different duration. Speech fragments were spoken by professional artists simulated their presence in various emotional conditions. For the research was developed appropriate technique. The experiment involved 10 people (5 men and 5 women).

For the experiments results the basic informative parameters were chosen parameters that are characterized the vowel phoneme included in the keyword (pitch frequency

parameters based on it (irregularity et al.), Formant frequencies) and the duration of utterance of the key word.

Research has confirmed the information available in the literature that the frequencies of the pitch are rather clear upward trend in the change of man EMC line "depression, stiffness - the norm - the excitement."

An analysis of literary sources and conducted research have shown, that the pitch frequency has a clear upward trend in the change of the human condition through the "depression, stiffness - the norm - excitement», but wherein the pitch frequency for the same phonemes in different speech fragments may differ significantly.

It was the ground to provide EC monitoring of ATC by permanent pitch frequency calculation for the specific speech fragments (extracted from smooth continuous speech) and checking the fact of pitch value belonging to the appropriate ATC condition of "norm" (calm condition). Not belonging of pitch value is evidence that the ATC is in inappropriate EC.

For the increasing of validity EC monitoring system work permanently analyzes the changes the values of formant frequencies (and their relationship) phonemes, constituents of speech fragments, isolated from the smooth continuous ATC speech. The most informative formant frequency are F2, F3, F4, and the relationship of these values of formant frequencies, obtaining at the moment of monitoring, to their values, calculating when finding speaker in the normal condition.

### **Subsystem of searching and allocation of "key" speech fragments from the smooth and continuous ATC Speech**

For the "keyword" from the smooth continuous speech can be apply the speaker independent Artificial Neural Networks (ANN), that is trained to recognize the keywords. ANN usage allows significantly improve the accuracy of the EC monitoring system in comparison with existent systems, work of which based on determination of the distances between the control and reference (listed in the database) vector of parameters.

However, it is obvious that a simple words enumeration using ANN is counterproductive; it does not allow the monitoring system to operate in the real time.

The authors have developed a method of fragments searching in continuous speech, the usage of which can significantly speed up the search process.

The increasing of system work achieving by quick words discarding, deliberately not included in the database (dictionary) keywords before processing by subsystem of EC monitoring. In this case, the ANN usage is only necessary to hypotheses checking derived from the application of the developed method.

The speech fragments searching in the ATC smooth continuous speech by which EC monitoring providing is based on applying of the developed models of speech fragments and their comparison with models that contained in the models database.

The database content is filled according to the results of preliminary research on the recognition of phonemes (allophone) and phonemic analysis.

The basis of the subsystem selection speech fragments (words and phrases) from the smooth and continuous speech is its segmentation into phonemes and pause with

the further searching speech fragments which contain specified amount of vowel and consonant phonemes.

Let's demonstrate the principle of a subsystem work on the spectrogram word «Переключитесь» example (this word is a part of phraseology command «Переключитесь на высоту», which is often used by air traffic controllers), depicted in the figure 1.

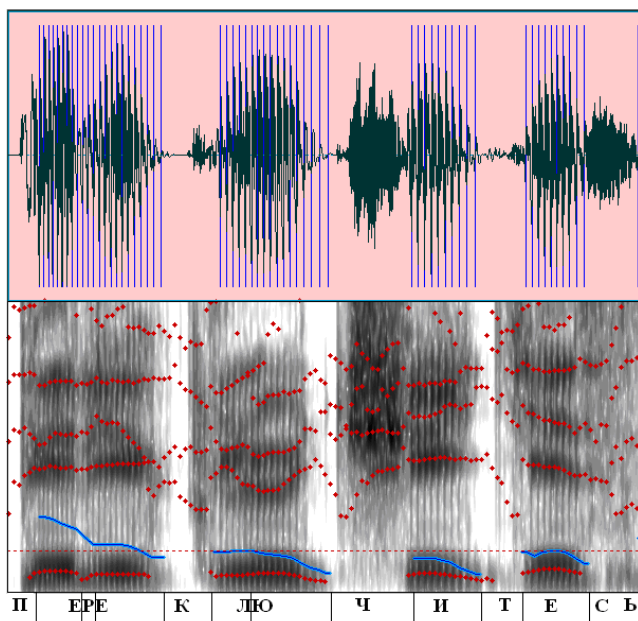


Fig. 1. the spectrogram of keyword «Переключитесь»

The figure 1 shows how the specified phraseological keyword can be represented as a sequence of phonemes and pauses.

Significant milestone when applying the developed method for increasing the speed of the system is the modeling of words extracted from the ATC continuous speech. These represent models are the sequence positions intended for the recognized phonemes; wherein under proper recognition understands the phonemes recognition (primarily vowels) and phoneme assignment to a particular class (e.g., class, voiceless consonants).

The words models database is created during registration dispatchers (ATC). When applying the developed method are discarded words, models that do not correspond to the words models, forms the basis of the words models. It is

important is the lack of recognition of the need for all phonemes keyword - enough to recognize (or refer to a specific class) several phonemes - their sequence will be a hypothesis to confirm or cast by ANN.

In such a way the implementation of the developed method for increasing the speed of the system is perform the following sequence of actions:

1. Making the model control keyword, built by the first words of the recognized phonemes.
2. Search in the database of the models of words that match the word, entered for analysis. In case of model-based words in the corresponding model hypothesized that analyzed the word is in the dictionary.
3. Hypothesis checking using ANN.
4. In case of "positive" outcome of the hypothesis checking proceed to the EC monitoring of ATC.

Note that the developed method does not require additional time, because phoneme segmentation and recognition of phonemes are elements of the sequence of actions committed during the EC monitoring of ATC.

During the EC determining of ATC it is important thing of absence of necessity for recognition of phonemes of the speech fragment of password - for the EC determination enough to recognize only the first few vowel phonemes.

The efficiency of the allocation of the required voice fragments of a continuous speech depends on the quality of its segmentation into phonemes.

## Conclusion

1. Presented the basic principles the subsystems construction of the developed EC monitoring system for ATC to information resources in the real time, the operation of which is based on the analysis of the parameters characterizing the speech fragments extracted from continuous speech.
2. Developed a system of informative parameters for monitoring the EC of ATC.
3. Developed a way to improve the performance of the subsystem selection of "key" speech fragments of ATC continuous speech.
4. The applying of the EC monitoring system can significantly improve safety dramatically decreased in numbers the amount of accidents and emergencies due to the reduction of the human factor.

## REFERENCES

- [1] Donoho, D.L. De-Noising by soft-thresholding // IEEE Trans. on Inform. Theory. – Vol.41. – №3. – 1995. – P.613-627.
- [2] Ramiashvili G.S. Automatic speaker recognition by voice. // M.: Radio and Communications, 1981. – 224 p.
- [3] Smolentsev N.K. Foundations of the theory of wavelets. – M.: DMK, 2005. – 303 p.
- [4] Temnikov V.A, Konforovych I.V., Peteichuk A.V. Control of access to information resources of air traffic controllers by voice. // Journal of the East-Ukraine National University im. V.Dalya. – 2013. – №15 (204). – Part 1. – P.199-203.
- [5] Temnikov V.A., Peteichuk O.V. Control of the air traffic controllers using the speech signal in real time // X International Scientific Conference "AVIA 2011". Materials – Vol.1. – K.: NAU, 2011. – P.2.105-2.108.
- [6] Temnikov V.A., Ponomarenko L.V. The method of noise reduction during speech recognition // Journal of the East-Ukraine National University im. V.Dalya. – №5 (111). – Part 1. – 2007. – P.123-127.
- [7] Temnikov V.A, Temnikova E.L. Determination of the psycho-physiological condition of operator in the automatic intrashift voice monitoring // Journal of the East-Ukraine National University im. V.Dalya – №6 (136). – Part 1. – 2009. – P.294-297.

## Знешкодження гіпохлоритних рідких відходів у кавітаційних полях за адіабатичних умов

Н.М. Гнатишин\*

Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

\*Corresponding author. E-mail: znak\_zo@ukr.net

Paper received 22.03.15; Revised 29.03.15; Accepted for publication 09.06.15.

**Анотація:** Знешкодження рідких відходів, що містять натрію гіпохлорит, запропоновано здійснювати у кавітаційних полях. Для їх збудження використовують ультразвукові випромінювачі або гідродинамічні кавітатори. Кінетичні залежності зміни концентрації натрію гіпохлориту під час його розкладу у кавітаційних полях описано рівняннями поліному. На підставі їх аналізу розраховано тривалість процесу до повного розкладу натрію гіпохлориту. Установлено, що здійснення розкладу натрію гіпохлориту в адіабатичних умовах характеризується вищою, порівняно з ізотермічними умовами, швидкістю процесу та значно нижчими питомими витратами енергії. В адіабатичних умовах внаслідок зростання температури у середовищі створюються умови для виникнення розвиненої кавітації. Завдяки цьому енергія, що вноситься у середовище ультразвуковим випромінювачем, або гідродинамічним кавітатором повніше витрачається на розклад натрію гіпохлориту. Встановлено, що ефективність знешкодження гіпохлоритних рідких відходів за допомогою гідродинамічного кавітатора є вищою приблизно в 1,7 раз, ніж у разі застосування ультразвукового випромінювача. Це зумовлене тим, що весь гіпохлоритний розчин проходить через кавітаційний пристрій гідродинамічного кавітатора струменевого типу, а в разі ультразвукового випромінювача обробленню підлягає лише частина реакційного середовища, яке перебуває під магнітостриктором. На основі розрахованих значень порядку реакції розкладу натрію гіпохлориту, зміни величини окисно-відновного потенціалу реакційного середовища, яке з часом зростає, та аналізу механізму процесів у кавітаційних полях за участю молекул води як середовища та гіпохлорит-іонів дійшли висновку, що розклад натрію гіпохлориту в кавітаційних полях відбувається за радикальним механізмом. Обґрунтовано, що застосування гідродинамічного кавітатора для знешкодження промислових рідких відходів, що містять натрію гіпохлорит, є вельми перспективним.

**Ключові слова:** рідкі відходи, натрію гіпохлорит, знешкодження, кавітація, розклад

Висококонцентровані рідкі відходи, що містять до  $40 \text{ г/дм}^3$  NaOCl, утворюються у технологіях каустичної соди і хлору, аеросилу, очищенні вентиляційних газів від хлору розчинами лугів [4]. Їх обсяги сягають декількох сотень  $\text{м}^3$  на добу. Схожі за складом та за обсягами рідкі відходи, що містять кальцію гіпохлорит, утворюються у виробництві магнію та хлору. Зазначені відходи підлягають обов'язковому практично повному знешкодженню, оскільки натрію гіпохлорит володіє сильними окисними властивостями навіть у лужному середовищі (редокс-потенціал дорівнює близько 0,9 В) [3,10], а тому вони можуть нанести непоправної шкоди природним екосистемам, передусім водним, у разі їх скидання у довкілля.

Для знешкодження висококонцентрованих гіпохлоритних рідких відходів очищення стічних вод від гіпохлоритів запропоновано низку методів, які ґрунтуються на різних фізико-хімічних засадах. Їх можна розділити на термічні некаталітичні та каталітичні [7, 2, 6], реагентні [9, 11], фотохімічні [1]. Зараз найпоширенішим є термічне каталітичне знешкодження. Як каталізатори використовують сполуки металів зі змінним ступенем окиснення. Каталітична активність цих металів зменшується у такому порядку:  $\text{Ir} > \text{Co} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Fe} > \text{Mn}$  [7, 2]. Оскільки гіпохлоритні стічні води мають лужну реакцію ( $\text{pH} > 12$ ), то NaOCl розкладається за кисневим механізмом, тобто з виділенням молекулярного кисню, а утворення шкідливих побічних продуктів, наприклад, хлору або хлоратів, що характерно в області нижчих значень pH, не відбувається [5].

Термічний каталітичний розклад є порівняно простим у технологічному та апаратурному аспектах. Однак цей процес через порівняно невисоку швидкість розкладу натрію гіпохлориту є доволі тривалим. Так, за температури близько  $55^\circ\text{C}$  та присутності Ніколу та Купруму сульфатів як каталізаторів тривалість процесу

складає 24-32 години, що зумовлює значні енергетичні витрати та його високу собівартість. Окрім того, каталізатор безповоротно втрачається у вигляді малорозчинних гідроксидів.

Зазначені й інші недоліки існуючих методів очищення рідких відходів від гіпохлоритів зумовлюють необхідність виконання досліджень, спрямованих на розроблення ефективної, екологічно та економічно обґрунтованої енерго-, ресурсозберігаючої технології знешкодження гіпохлоритних стічних вод.

Аналіз джерел інформації [11] й результати досліджень розкладу NaOCl за умов збудження явища кавітації та за ізотермічних умов, виконаних нами, дають підстави стверджувати, що значний практичний інтерес для знешкодження гіпохлоритних рідких відходів представляють методи, які ґрунтуються на здійсненні процесів у кавітаційних полях.

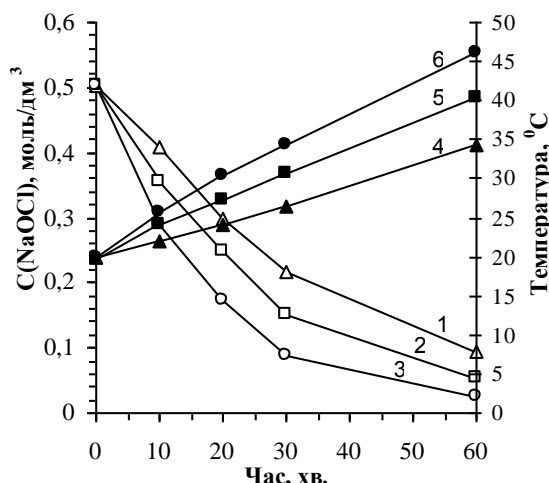
Дослідження розкладу натрію гіпохлориту під дією УЗ-випромінювань за ізотермічних умов підтвердило вищу, порівняно із промисловим термічним каталітичним методом, ефективність процесу. Але впродовж перебігу процесу частина енергії, яка підводиться у систему з акустичними коливаннями УЗ-діапазону, втрачається – відводиться з реактора теплоносієм, що необхідно для забезпечення ізотермічного режиму.

Тому метою роботи було вивчення розкладу натрію гіпохлориту за умов, що наближаються до адіабатичних – без відведення теплової енергії, що виділяється внаслідок перебігу кавітаційних явищ.

Дослідження виконували із використанням усереднених реальних рідких відходів виробництва каустичної соди та хлору із вмістом NaOCl  $37 \text{ г/дм}^3$  ( $0,503 \text{ моль/дм}^3$ ). Для збудження явища кавітації використовували ультразвуковий (УЗ) випромінювач магнітострикційного типу "Ultrasonic Disintegrator UD-20" (частота УЗ-випромінювання  $22 \text{ кГц}$ , потужність –

8,0...12,5 Вт) та гідродинамічний кавітатор (ГДК) струменевого типу з потужністю приводу 1,1 кВт. Хоча ці пристрої відрізняються потужністю та способом збудження кавітації, але перебіг процесів, що відбуваються у відповідних кавітаційних полях є тождивними. Об'єм реакційного середовища, який використовували у дослідженнях: у разі УЗ-випромінювача – 1 дм<sup>3</sup>, у разі ГДК – 10 дм<sup>3</sup>.

Залежності концентрації натрію гіпохлориту та зміна температури середовища у разі збудження явища кавітації УЗ-випромінювачем за початкової температури середовища 20°C наведено на рис. 1.



**Рис. 1.** Залежність концентрації NaOCl (1, 2, 3) та температури середовища (4, 5, 6) від потужності УЗ-випромінювача за адиабатичних умов: потужність УЗ-випромінювача, Вт: 8,0 – 1, 4; 10,2 – 2, 5; 12,5 – 3, 6

У початковий період зміна концентрації NaOCl у часі та відповідно швидкість процесу за адиабатичних умов, як і варто було очікувати, практично дорівнює такій самій зміні в ізотермічних умовах (20°C) за однакових потужностей УЗ-випромінювання. Так, як за ізотермічних, так й адиабатичних умов за потужності 8,0; 10,2 і 12,5 Вт початкова швидкість розкладу

NaOCl відповідно дорівнювала  $1,26 \cdot 10^{-4}$ ;  $1,51 \cdot 10^{-4}$  та  $2,13 \cdot 10^{-4}$  моль/дм<sup>3</sup>·с, а значення константи швидкості процесу становили відповідно  $2,483 \cdot 10^{-4}$ ;  $4,266 \cdot 10^{-4}$  і  $6,839 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup>.

Надалі, після 10...15 хв. спостерігається інтенсивніше, ніж за ізотермічних умов, зменшення концентрації натрію гіпохлориту, що пояснюється поступовим практично прямолінійним збільшенням температури середовища. Як наслідок, швидкість процесу в діапазоні зміни часу від 10 до 30 хв. практично не змінюється, хоча, відповідно до закону діючих мас, вона мала б зменшуватись через зменшення концентрації натрію гіпохлориту у реакційному середовищі. Отже, збільшення температури середовища внаслідок перебігу кавітації, компенсує зменшення концентрації реагенту. При цьому, середні значення констант швидкості процесу, розраховані для певних проміжків часу, до приблизно 60-ої хв. зростали (таблиця 1).

Отримані результати свідчать про збільшення ефективності внесення енергії внаслідок збудження явища кавітації, ніж у разі її підведення у вигляді теплової.

Важливим параметром процесу знешкодження рідких гіпохлоритних відходів як з технологічної, так і економічної точок зору є його тривалість. Вона визначає об'єми технологічного обладнання, енергетичні витрати на здійснення процесу тощо. Як зазначали вище, необхідне повне знешкодження гіпохлоритних рідких відходів. Оскільки тривалість процесу є значною, то її визначали переважно розрахунково. Лише в окремих випадках повноту перетворення натрію гіпохлориту визначали аналізом реакційного середовища на вміст NaOCl йодометричним методом.

Для розрахункового визначення тривалості розкладу експериментальні залежності концентрації NaOCl від часу описували рівняннями поліному як функцію  $C(\text{NaOCl}) = f(\tau)$ . Відповідні коефіцієнти поліномних рівнянь та величини достовірності апроксимації ( $R^2$ ) наведено в таблиці 2. Значення  $R^2$ , що не значно відрізняються від одиниці, свідчать про високу достовірність результатів.

**Таблиця 1.** Значення константи швидкості розкладу NaOCl у кавітаційних полях у різні періоди процесу за адиабатичних умов

№ з/п	Потужність УЗ-випромінювача, Вт	Інтервал часу, хв.	Діапазон зміни температури, град.	Середнє значення, $\text{к} \cdot 10^{-4}, \text{с}^{-1}$
1	8,0	10...20	22,1...24,1	4,62
2		20...30	24,1...27,6	7,61
3	10,2	10...20	24,0...27,2	11,10
4		20...30	27,2...30,6	10,23
5	12,5	10...20	25,7...30,4	12,29
6		20...30	30,4...34,3	15,33

**Таблиця 2.** Коефіцієнти поліномних рівнянь та відповідні величини достовірності апроксимації ( $R^2$ ) для експериментальних даних, отриманих за адиабатичних умов

№ з/п	Потужність УЗ-випромінювача, Вт	Коефіцієнти поліному $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ ( $y = C(\text{NaOCl}); x = \tau$ )				$R^2$
		a	b	c	d	
1	8,0	$2 \cdot 10^{-6}$	$-4 \cdot 10^{-5}$	$-9,8 \cdot 10^{-2}$	0,504	0,998
2	10,2	$2 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$-1,6 \cdot 10^{-2}$	0,501	0,997
3	12,5	$-3 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$-2,5 \cdot 10^{-2}$	0,501	0,993



Отримані рівняння розв'язували щодо часу ( $\tau$ ), тобто за значення  $C(\text{NaOCl}) = 0$ .

З урахуванням тривалості процесу й потужності випромінювання розраховували питомі витрати енергії на розклад натрію гіпохлориту за рівнянням,  $\text{кДж/дм}^3$ :

$$E = \frac{N \cdot \tau \cdot 3600}{V},$$

де  $N$  – потужність УЗ-випромінювача, Вт;

$\tau$  – тривалість процесу розкладу, год.;

$V$  – об'єм гіпохлоритних рідких відходів, які піддавали кавітаційному обробленню ( $V = 1 \text{ дм}^3$ ).

Результати досліджень розкладу натрію гіпохлориту під дією УЗ-випромінювання за ізотермічних та адіабатичних умов наведено у таблиці 3.

Як видно з табл. 3, в усіх випадках, тобто і в ізотермічних умовах за різних температур, і в адіабатичних збільшення потужності УЗ-випромінювача однозначно приводить до зменшення тривалості процесу. Однак залежність питомої витрати енергії на розклад натрію гіпохлориту від потужності УЗ-випромінювання має різний характер. Так, в ізотермічних за 20 і 30°C та адіабатичних ( $t_0 = 20^\circ\text{C}$ ) умовах збільшення потужності УЗ-випромінювання призводить до збільшення питомої витрати енергії, а в ізотермічних умовах за 40°C – до зменшення.

**Таблиця 3.** Тривалість процесу та значення питомої енергії на розклад  $\text{NaOCl}$  в ізотермічних та адіабатичних умовах за різної потужності УЗ-випромінювача

№ з/п	Умови досліджу	Тривалість процесу розкладу, год.			Значення питомої енергії, $\text{кДж/дм}^3$		
		8,0 Вт	10,2 Вт	12,5 Вт	8,0 Вт	10,2 Вт	12,5 Вт
1	Ізотермічні, 20°C	18,3	14,8	12,8	527	544	576
2	Ізотермічні, 30°C	15,0	12,4	10,6	432	455	477
3	Ізотермічні, 40°C	13,5	9,8	7,9	389	360	355
4	Адiабатичні, $t_0 = 20^\circ\text{C}$	9,1	7,9	6,9	226	290	310

Збільшення енерговитрат за нижчих температур в ізотермічних умовах розкладу  $\text{NaOCl}$  можна пояснити порівняно низьким парціальним тиском водяної пари, внаслідок чого виникнення зародків кавітаційних бульбашок утруднюється. Підвищення температури приводить до зростання парціального тиску водяної пари, і, як наслідок, явище кавітації збуджується легше. Про це свідчить деяке зменшення питомої енерговитрати у разі збільшення температури процесу з 20 до 30°C. У разі здійснення процесу за 40°C підвищення потужності УЗ-випромінювання спричиняє зменшення питомих енерговитрат. Це зумовлене істотним збільшенням парціального тиску водяної пари та створенням енергетично вигідніших умов збудження кавітації. При цьому явище кавітації набуває характеру явища, розвинутого в просторі. Це означає, що змикання первинної кавітаційної бульбашки спричиняє виникнення, розвиток і змикання вторинної кавітаційної бульбашки і так далі. Звичайно, що процес розвитку кавітації за участю первинної кавітаційної бульбашки у часі затухає, але порівняно із перебігом процесу за нижчих температур це явище має розвинутий характер. Це й зумовлює зменшення витрат енергії на розклад натрію гіпохлориту.

За адіабатичних умов питомі витрати енергії на розклад  $\text{NaOCl}$  зі збільшенням потужності УЗ-випромінювача від 8,0 до 12,5 Вт зростають на 37%. Ймовірно, це зумовлено збільшенням швидкості розкладу  $\text{NaOCl}$  на початкових стадіях процесу й, відповідно, істотним зменшенням концентрації гіпохлорит-іонів. Тому значна кількість енергії УЗ-випромінювання витрачається не на розклад  $\text{NaOCl}$ , а на непродуктивну витрату енергії на нагрівання середовища. Тобто, зі зменшенням концентрації  $\text{NaOCl}$  селективність дії УЗ-випромінювання зменшується. Проте, навіть незважаючи на збільшення питомої енерговитрати, вони є меншими, ніж у разі реалізації процесу в ізотермічних умовах. Очевидно, що акумуляція енергії, що виділяється внаслідок

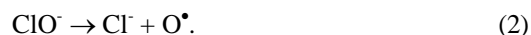
кавітації, в реакційному середовищі сприяє розвитку кавітаційних явищ.

Порядок реакції розкладу натрію гіпохлориту в кавітаційних полях змінюється в межах від 0,89 до 1,03, тобто є близьким до одиниці. Така величина порядку реакції притаманна для реакцій, що відбуваються за радикальним механізмом. Такий висновок підтверджується аналізом процесів у кавітаційному полі за участю гіпохлорит-іонів та води як молекул середовища.

Перш за все, у кавітаційному полі відбувається розклад – соноліз – молекул води з утворенням цілої низки проміжних продуктів [8]; цей процес зображають схематично так:



Внаслідок виділення теплової енергії в зоні змикання кавітаційної бульбашки розкладається гіпохлорит-іон, а, оскільки середовище є лужним, то цей розклад відбувається за кисневим механізмом, тобто з виділенням атомарного Оксигену



Утворенні під час сонолізу води продукти відновного характеру взаємодіють з гіпохлорит-іоном:



Це сприяє знешкодженню гіпохлорит-іонів у рідких відходах.

Локальне підвищення величини окисно-відновного середовища до значень понад 0,72 В, тоді як ця величина початкових відходів не перевищувала 0,6 В, свідчить про появу й тимчасове накопичення у середовищі сполук із сильними окисними властивостями, наприклад,  $\text{HO}_2^\bullet$ .

Магнітострикційні УЗ-випромінювачі, як правило, характеризуються порівняно невисокими значеннями коефіцієнта корисної дії. Тому наступним етапом робо-

ти було дослідження розкладу натрію гіпохлориту в струменевому гідродинамічному кавітаторі. У цих апаратах усе без винятку реакційне середовище проходить через зону кавітації, тобто підлягає обробленню в кавітаційних полях, тоді як в УЗ-випромінювачах зона оброблення розчину розташована під магнітостриктором і обмежена в просторі. Окрім того, в УЗ-випромінювачі і гідродинамічному кавітаторі ефект кавітації збуджується принципово різними способами, а тому необхідно було підтвердити схожість закономірностей процесів розкладу натрію гіпохлориту в обох типах апаратів. Надалі це дасть змогу масштабувати процес знешкодження гіпохлоритних стічних вод під час розроблення відповідної технології і проектування промислової установки заданої продуктивності.

Дослідження виконували на установці з гідродинамічним кавітатором струменевого типу. Об'єм гіпохлоритних стічних вод, який використовували у кожному з досліджень, дорівнював 10 дм<sup>3</sup>. Дослідження проводили за тиску на вході у струменевий кавітатор 0,57 МПа.

Зміну концентрації натрію гіпохлориту у гідродинамічному кавітаторі за ізотермічних та адиабатичних умов наведено на рис. 2. На підставі отриманих даних розраховано деякі кінетичні параметри процесу. Так, швидкість розкладу натрію гіпохлориту в гідродинамічному кавітаторі за ізотермічних умов за температури 20 °С дорівнювала  $3,70 \cdot 10^{-4}$  моль/с·дм<sup>3</sup>, що 1,73 рази більше, ніж за тих самих умов в УЗ-випромінювачі. При цьому константа швидкості сягає значень  $1,017 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  (у разі УЗ-випромінювача вона дорівнювала  $6,839 \cdot 10^{-4}$ ), а порядок реакції дорівнював 0,97, тобто також наближався до 1.

За адиабатичних умов швидкість процесу в ГДК зростає до  $5,37 \cdot 10^{-4}$  моль/дм<sup>3</sup>·с, проти  $2,38 \cdot 10^{-4}$  в УЗ-випромінювачі.

Впродовж перших 10 хв. процесу за адиабатичних умов середнє значення константи швидкості дорівнювало  $1,883 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ , а з часом зросло до 0,55 (в інтервалі зміни температури від 29 до 34 °С), що, очевидно, пояснюється зростанням температури середовища.

Здійснення процесу знешкодження гіпохлоритних стічних вод у гідродинамічному кавітаторі дав змогу

скоротити тривалість розкладу NaOCl до 7,7 і 4,2 год. відповідно за ізотермічного (20 °С) та адиабатичного теплових режимів. Відповідно питома витрата енергії дорівнювала 304 і 166 кДж/дм<sup>3</sup>. Порівняно із найнижчими значеннями питомої витрати енергії, які розраховано за даними досліджень з використанням УЗ-випромінювача, ці значення для гідродинамічного кавітатора є приблизно в 1,7 рази меншими.

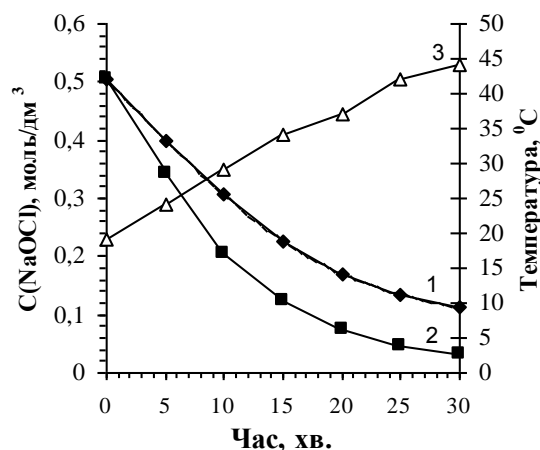


Рис. 2. Залежність концентрації NaOCl (1, 2) та температури середовища за адиабатичних умов (3) від часу в гідродинамічному кавітаторі, умови:

1 – ізотермічні, 20 °С; 2 – адиабатичні ( $t_0=20$  °С)

Отримані результати переконливо свідчать про енергетичну ефективність знешкодження гіпохлоритних стічних вод із застосуванням гідродинамічного кавітатора струменевого типу та здійснення процесу в адиабатичному режимі. Окрім того, є підстави очікувати, що застосування насосів, якими подають рідиннофазне середовище у кавітатор і які характеризуються більшими продуктивністю та напором, дасть змогу досягнути ще вищої ефективності процесу знешкодження гіпохлоритних стічних вод. Це зумовлене тим, що за збільшення напору швидкість струменів, а відтак і їх кінетична енергія зростатимуть, а, отже, збуджуватимуться інтенсивніші кавітаційні поля – як наслідок, швидкість розкладу натрію гіпохлориту збільшуватиметься.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Бикбулатов И.Х. Безотходное производство хлоргидринов. – М.: Химия, 2000. – 167 с.
- [2] Church, J.A. Kinetics of the uncatalyzed and Cu(II)-catalyzed decomposition of sodium hypochlorite // Ind. Eng. Chem. Res. – 1994. – V. 33. – P. 239-245.
- [3] Frank A. Miller. Disinfection with Liquid Sodium Hypochlorite: Principles, Methods, and Lessons Learned // Florida Water Resources Journal. – 2012. – April. – P. 4-8.
- [4] Знак З.О., Гнатишин Н.М. Інтенсифікація термічного розкладу натрію та кальцію гіпохлоритів // Восточно-європейський журнал передових технологій. – 2010, – № 6/6 (48). – С. 40-43.
- [5] Колесников И.В. Устойчивость реальных растворов гипохлорита натрия // Хим. пром. 1991. – № 6. – С. 361-365.
- [6] Kwang-Wook Kim, Eil-Hee Lee, Dong-Yong Chung, Jei-Kwon Moon, Hyun-Soo Shin, Jung-Sik Kim, Dong-Woo Shin. Manufacture characteristics of metal oxide-hydroxides for the catalytic decomposition of a sodium hypochlorite solution // Chemical Engineering Journal. 2012. – № 8. – P. 200-202.
- [7] Lister, M.W. Decomposition of sodium hypochlorite; the catalyzed reaction // Canadian Journal of Chemistry. 2011. – № 34(4). – P. 479-488.
- [8] Маргулис М.А. Основы звукохимии. - М.: Высшая школа, 1984. – 288 с.
- [9] Moorhouse, J. Modern Chlor-Alkali Technology – Chichester: MPG Books Ltd. – 2001. – 48 p.
- [10] Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод / Запольський А.К., Мішкова-Клименко Н.А., Астрелін І.М. – К.: Лібра, 2000. – 552 с.
- [11] Yangang Feng, Daniel W. Smith, James R. Bolton. Photolesis of aqueous free chlorine species (HOCl and OCl<sup>-</sup>) with 254 nm ultraviolet light // J. Environ. Eng. – 2007. – № 6. – P. 277-284.

#### REFERENCES

- [1] Bikbulatov, I.H. Waste-free production of chlorohydrins. 2000. – M.: Chemistry. – 167 p.
- [2] Church, J.A. Kinetics of the uncatalyzed and Cu(II)-catalyzed decomposition of sodium hypochlorite. // *Ind. Eng. Chem. Res.* 1994, № 33. – P. 239-245.
- [3] Frank A. Miller. Disinfection with Liquid Sodium Hypochlorite: Principles, Methods, and Lessons Learned. // *Florida Water Resources Journal*. 2012, April. –P. 4-8.
- [4] Znak, Z.O., Hnatyshyn N.M. Intensification of thermal decomposition of sodium and calcium hypochlorite. // *East-European Journal of advanced technologies*. 2010. № 6/6 (48). – P. 40–43.
- [5] Kolesnikov, I.V. Stability of real solutions of sodium hypochlorite // *Chem. Ind.* 1991. №6. – P. 361-365.
- [6] Kwang-Wook Kim, Eil-Hee Lee, Dong-Yong Chung, Jei-Kwon Moon, Hyun-Soo Shin, Jung-Sik Kim, Dong-Woo Shin. Manufacture characteristics of metal oxide–hydroxides for the catalytic decomposition of a sodium hypochlorite solution. // *Chemical Engineering Journal*. 2012. № 8. – P. 200–202.
- [7] Lister, M.W. Decomposition of sodium hypochlorite; the catalyzed reaction. // *Canadian Journal of Chemistry*. 2011. № 34(4). – P. 479–488.
- [8] Margulis, M.A. Fundamentals of sonochemistry. –M.: Higher School, 1984. – 288 p.
- [9] Moorhouse, J. Modern Chlor-Alkali Technology. Chichester: 2001. MPG Books Ltd. 48 p.
- [10] Zapolskyi, A.K., Mishkova-Klymenko, N.A., Astrelin, I.M. Physical and chemical bases of technology of wastewater treatment. 2000. - K.: Libra. 552 p.
- [11] Yangang Feng, Daniel W. Smith, James R. Bolton. Photolysis of aqueous free chlorine species (HOCl and OCl<sup>-</sup>) with 254 nm ultraviolet light. // *J. Environ. Eng.* 2007. № 6. – P. 277–284.

#### Neutralization hypochloritic liquid waste in cavitation fields under adiabatic conditions

N.M. Hnatyshyn

**Abstract:** The treatment of liquid waste containing sodium hypochlorite proposed to be implemented in the cavitation fields. For excitation applied ultrasonic emitters or hydrodynamic cavitators. Kinetic dependences of change of concentration of sodium hypochlorite during its decomposition in cavitation fields are described by polynomial equations. On the basis of their analysis calculated the duration of the process until complete decomposition of sodium hypochlorite. It is established that the implementation schedule of sodium hypochlorite in debating conditions characterized by higher compared to isothermal conditions, the speed of the process and significantly lower unit costs of energy. Under adiabatic conditions, the temperature rise formed the conditions for the emergence of developed cavitation. Thanks to this, the energy deposited in a medium by an ultrasonic emitter, or hydrodynamic cavitator better spent on the decomposition of sodium hypochlorite. It is established that the efficiency of neutralization of hypochloritic liquid waste using hydrodynamic cavitator above about 1.7 times lower than in case of using an ultrasonic transducer. This is because all hypochloritic solution passes through the cavitation device of the hydrodynamic cavitator jet type. In the case of an ultrasonic transducer treatment is subject to only a portion of the reaction medium, which is under magnetostriction. Based on the calculated values of the order of the decomposition reaction of sodium hypochlorite, change the value of the red-ox potential of the reaction environment, which grows over time, and analysis of the mechanism of cavitation processes in the fields with the participation of water molecules as environment and hypochlorite ion came to the conclusion that the schedule of sodium hypochlorite in cavitation fields takes place by a radical mechanism. It is proved that application of hydrodynamic cavitator for disposal of industrial liquid waste containing sodium hypochlorite, is a very promising.

**Keywords:** liquid waste, sodium hypochlorite, decontamination, cavitation, schedule

## Стереолого-стереометричні принципи РЕМ-мікроскопії дисперсних ґрунтів

В.М. Мельник, О.В. Піскунова\*

Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки, м. Луцьк, Україна

\*Corresponding author. E-mail: oli4ka\_1308@mail.ru

Paper received 17.04.15; Revised 23.04.15; Accepted for publication 16.05.15.

**Анотація.** Розглянута методологія стереолого-морфологічного аналізу РЕМ-зображень дисперсних ґрунтів. Пропонується використовувати метод вейвлетів для радіометричної корекції РЕМ-зображень і математичний апарат дискретних осей Вороного для ідентифікації порового простору мікроструктурної організації ґрунтів як дисперсних систем. Зроблено акцент на використанні оригінального програмного пакету «Stiman». Експериментальні дослідження приведені в статті виконані з використанням сучасних РЕМ (НІТАСНІ S-800, Японія). Отримані результати підтверджують перспективність стереолого-морфологічного аналізу РЕМ-зображень на мікронному та субмікронному рівнях.

**Ключові слова:** растрова електронна мікроскопія, вейвлети, осі Вороного, стереологія, морфометрія

**Вступ.** Важливою діагностичною ознакою ґрунту, яка в значній мірі визначає його властивості (водний режим, явища тепло- і масопереносу, родючість та ін.) є мікроструктура, зокрема пористість [1; 2; 3]. Існує також тісний зв'язок між пористістю ґрунту та його протирозійною стійкістю. Проте питання про мікроморфологію порового простору ґрунту на мікрорівні залишається слабо вивченим [3; 4]. Переважна більшість робіт з цього напрямку стосується якісної характеристики будови пор, оскільки кількісні дослідження на мікрорівні обмежені головним чином технічним рівнем аналізу зображень, що отримуються з допомогою мікроскопів [5; 6]. При цьому особливе місце займають растрові електронні мікроскопи (РЕМ), які дозволяють проводити дослідження ґрунтів, в різних режимах і в широкому діапазоні збільшень ( від 20 до 10000 крат) [4; 6].

**Аналіз останніх наукових досліджень.** В області морфометричного аналізу ґрунтової структури одними із перших були роботи А. Йонгеріуса [2; 3], який в 1970-х роках запропонував спосіб діагностики будови порового простору ґрунту (головним чином макропор), використовуючи показник сумарної площі пор в шліфах. Дослідження в області мікроморфометрії пор дозволили О.Б. Скворцовій в 1990-х роках запропонувати класифікацію типів будови порового простору, використовуючи показники форми та орієнтації макропор в шліфах [2]. У подальших дослідженнях було отримано нові дані про будову порового простору дерново-підзолистих ґрунтів з використанням їх 3D зображення [3; 7]. Для лісових ґрунтів Степового Придніпров'я було створено візуалізовану комп'ютерну модель, яка імітує їх ґрунтову мікробудову [8]. На даний час в літературі практично немає даних, що відображають морфометрію порового простору ґрунтів на всіх рівнях структурної організації ґрунтового матеріалу – від ультрамікропор до макропор. Однак подібні дослідження важливі тим, що завдяки їм можливо отримати характеристику структури ґрунту.

**Матеріали і методи.** Дослідження пористих матеріалів на мікронному та субмікронному рівнях здійснюється переважно методами растрової електронної мікроскопії (РЕМ) [5; 6; 7]. Хоча на сьогодні бум РЕМ суттєво знизився, проте в контексті мікроскопічних досліджень порового простору в ґрунтознавстві не втратив своєї актуальності. При цьому під час таких

досліджень потрібно розв'язувати задачу розпізнавання образів, яка за своєю сутністю є достатньо складною [4].

В останні роки у таких дослідженнях із проблеми цифрової обробки зображень, на відміну від раніше застосовуваних Фур'є-методів, використовують вейвлет-перетворення [9; 10]. Отримані за допомогою таких перетворень результати мають більшу інформативність та оперативність, завдяки чому можна безпосередньо обробляти такі дані, які за традиційного підходу аналізувати важко.

У мікроскопічних дослідженнях дисперсних ґрунтів основою є задача розпізнавання пор та мікрочастинок. Розв'язати цю задачу традиційними методами досить складно. Нами пропонується застосувати двовимірні полігони Вороного [11; 12; 13]. У такій постановці задача розв'язується вперше.

У зв'язку з інтенсифікацією нанотехнологічних досліджень, появою нових математичних методів розрахунку на сьогодні спостерігається значний прогрес у обробці зображень, зокрема на мікрорівнях. За ряду причин у вітчизняній літературі теоретичні та практичні аспекти даної проблематики недостатньо науково обґрунтовані. Відповідно є потреба розробки спрощеного стереолого-стереометричного аналізу РЕМ-зображень, адаптованих до дослідження дисперсних матеріалів і ґрунтів [14].

### Виклад основного матеріалу

#### І. Узагальнена структурна модель стереолого-стереометричного аналізу РЕМ-зображень

При розв'язанні задач статистичного опису особливостей текстури поверхні мікрооб'єктів за їхніми РЕМ-зображеннями важливими питаннями є отримання 2-D і 3-D характеристик [5]. На рис. 1 показана узагальнена структурна модель стереолого-стереометричного аналізу РЕМ-зображень. Відповідно до цієї схеми розглянемо більш детально стереологічний аналіз.

Число елементів РЕМ-зображень задається програмно і в залежності від необхідної точності складає 512x512 або 1024x1024 пікселів. В середині кожного пікселя визначається і кодується його значення, що відповідає цифровій інтенсивності сигналу. Найчастіше практична реалізація кількісно-стереологічного аналізу мікрозображень (світлова, просвічуюча, растрова мікроскопія) здійснюється за такою схемою.

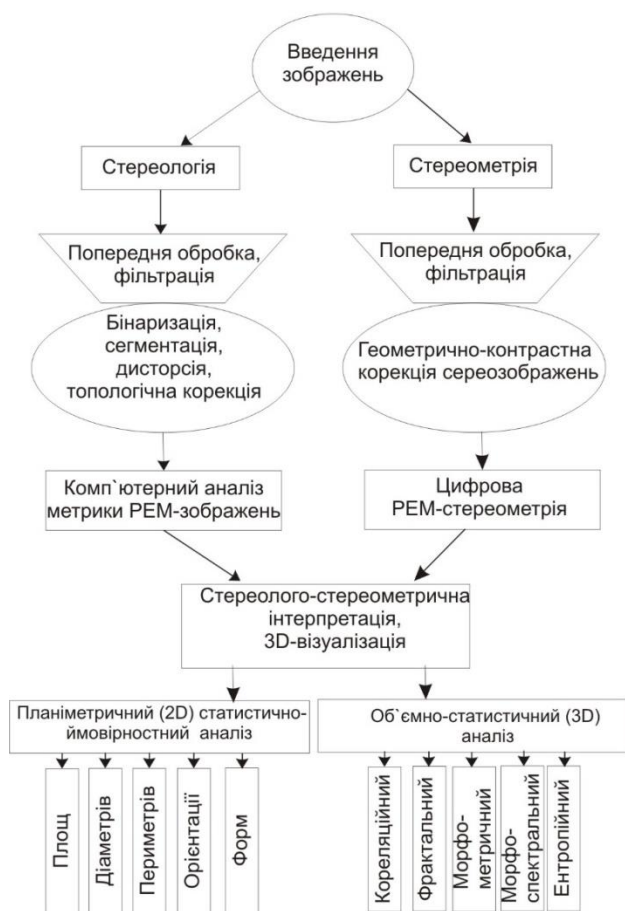


Рис. 1. Схема стереолого-стеометричного аналізу PEM-зображень

Спочатку вводиться оцифроване зображення досліджуваного об'єкта, потім проводять його попередню обробку – коригування яскравості, контрастності, здійснюють цифрову фільтрацію. Наступним кроком є трансформація цифрового зображення у бінарну форму та проведення сегментації. З метою інтерактивної корекції здійснюють комп'ютерну візуалізацію зображення [7; 10]. На завершальному етапі виконують планіметричний (2D) статистично-ймовірнісний аналіз розподілу часток (пор).

## II. Математичний формалізм стереології порового простору дисперсних ґрунтів

Для практичної реалізації використовують процеси фільтрації PEM-зображень, тобто усунення спотворень зображення, які виникають внаслідок дисторсії, заряджання електронним пучком, дрейфу зображення.

Застосовувані на сьогодні методи фільтрації не мають достатньої точності та оперативності (порівняно, наприклад, із широко нині використовуваним синусним рекурсивним фільтром Батерворта), тож в останні роки [1; 9; 10] набув широкої популярності метод фільтрації зображень, що ґрунтується на так званих вейвлет-перетвореннях. Коротко суть цього методу [13] проілюструємо на прикладі апроксимації функції  $f(x)$  у вигляді:

$$f(x) = f(x_0) + \sum_{i=1}^n \frac{f^{(i)}(x_0)}{i!} (x - x_0) \quad (1)$$

У формулі (1) виділяються два доданки. Перший –  $f(x_0)$  – є грубим наближенням функції  $f(x)$ , а другий

(сума) є уточнювальною величиною. Уточнення може робитися до нескінченності, але зазвичай обмежується деякою точністю при  $n = k$ , і саме на формулі (1) базується вейвлет-перетворення. Слово «вейвлет» проходить від англійського «wavelet» – хвильовий, і саме такий характер мають уточнювальні складові на певному інтервалі їх зміни. Аналогами ж таких уточнювальних функцій у формулі (1) є параметри  $f^{(i)}(x_0)$ .

У загальноприйнятих позначеннях безперервне вейвлет-перетворення записується так:

$$W_{\psi}^f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2)$$

де  $a$  – масштаб;  $b$  – параметри зсуву;  $\Psi^*$  – складова компонента перетворення  $W_{\psi}^f(a, b)$ .

У нашому випадку найбільш цікавою є цифрова фільтрація PEM-зображень. На практиці така фільтрація вейвлет-перетвореннями дозволяє застосовувати широкий спектр різноманітних вейвлетоутворюючих функцій, найвідомішими з яких є вейвлети Хаара, Добеші, Морле, Майєра, «мексиканський капелюх». Ми користувалися вейвлетоутворюючими функціями Хаара:

$$\Psi(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq t < 1/2 \\ -1 & \text{при } 1/2 \leq t < 1 \\ 0 & \text{у решті випадків} \end{cases} \quad (3)$$

Більш повно та детально ці питання висвітлено у спеціалізованій літературі.

## III. Розпізнавання пор (частинок) із застосуванням діаграм Вороного

Виділення скелетного (твердого) компонента структури мікрооб'єктів у PEM є однією з найбільш складних і актуальних задач стереолого-морфологічного аналізу [4]. Основна проблема пов'язана з неоднозначністю, а в більшості випадків – і неможливістю вибору такого оптимального рівня дискримінації (як це прийнято у широко використовуваному пороговому методі), за якого тверді структурні елементи виділяються на напівтоновому зображенні за мінімальних спотворень їхніх розмірів і форм. Найскладніші при цьому групи з близько розміщених один до одного структурних елементів, виділення яких нестійке відносно до параметрів бінаризації. Як наслідок, за автоматичного стереолого-морфологічного аналізу такі групи можуть сприйматися як один структурний елемент, а це призводить до спотворення результатів аналізу – завищення числа крупних мікрооб'єктів і заниження дрібніших.

Тому особливої актуальності набуває задача коректного розподілу конгломератів структурних елементів на складові [5; 12; 14]. Наявні ж на сьогодні підходи, пов'язані із застосуванням суперпозиції базових методів математичної морфології (дилатація, ерозія тощо), не вирішують цієї проблеми.

Нами запропоновано застосувати двовимірні полігони Вороного. Пропонується алгоритм, який базується на використанні дискретних осей Вороного для граничних точок структурних елементів.

Формально узагальнений запис діаграм Вороного такий [11]:

$$GP_i = \{x | d(x, i) \leq d(x, j); j \in S, j \neq i\} \quad (4)$$

Тут  $S = S_1, S_2, \dots, S_n$  – множина  $n$  елементів на площині;  $d(x, i)$  – найменша евклідова відстань від будь-якої локалізації  $x$  в площині до будь-якої точки.

При цьому центральна дискретна вісь Вороного визначається як діаграма Вороного першого порядку для граничних точок на перетині з твірною областю  $S$ :

$$DVMA(\hat{B}(S))^{def} = Vor_1(\hat{B}(S)) \cap S \quad (5)$$

Відповідно діаграма Вороного другого порядку наступна:

$$DVMA(\hat{B}(S))^{def} = Vor_1(\Omega)^{def} = p_i \notin \Omega_i \neq jH(p_i, p_j) \quad (6)$$

де  $H(p_i, p_j)$  – геометричне місце точок із  $\Omega$ , які ближчі до  $p_i$ , ніж до  $p_j$ .

При такому підході дискретна вісь Вороного є плоским графіком, кожне ребро якого утворюється парою граничних точок. Щоб зменшити вплив дрібних деталей межі мікрооб'єкта на форму центральних дискретних осей Вороного, застосовується спеціальна процедура регуляризації отриманого графа з використанням вагових функцій оцінки залишкової різниці. Їх застосування детально висвітлено у роботах.

Ерліх Р. та Вайнберг Б. [2] запропонували здійснювати стереолого-морфологічний аналіз мікрозображень (РЕМ, ПЕМ та інші) характеристикою форм і розмірів мікроструктурних елементів через площу поверхні їх контурів, периметрів та еквівалентних діаметрів [15]. При цьому доцільно користуватися методом масок  $SQ_i$  розміром  $2 \times 2$ , можливі варіанти яких показано на рис. 3.

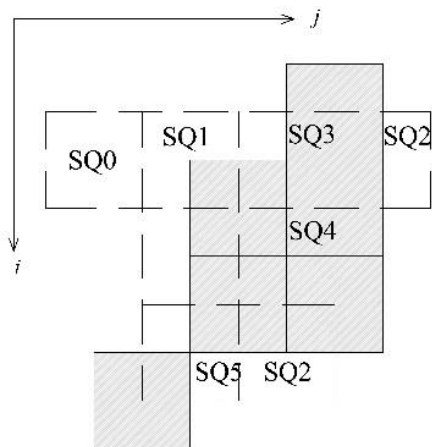


Рис. 2. Схема покриття мікрооб'єкта масками  $SQ$

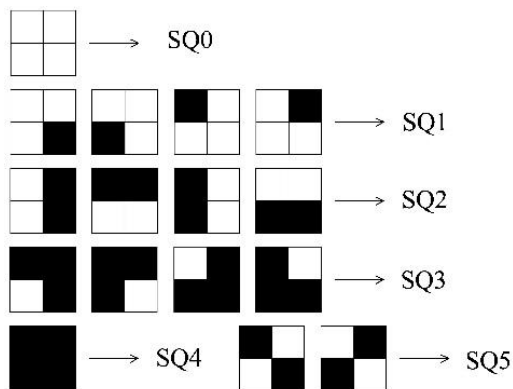


Рис. 3. Типи масок (еталонних образів  $SQ$ )

Схема поділу РЕМ-зображення, виділення фрагментів РЕМ-зображення і покриття їх масками  $SQ_i$  показана на рисунках 2 та 3. Для такого підходу отримані у явному вигляді наступні формули [16]:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow SQ0;$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow SQ1;$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow SQ2; \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow SQ3;$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow SQ4; \quad \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow SQ5,$$

де 1 – піксел, що належить досліджуваному фрагменту об'єкта (пори, частки); 0 – піксел, що не належить досліджуваному об'єкту.

Площа  $A$  (Area) периметр  $P$  і число топологічно сполучених компонент  $E$  досліджуваних компонентів об'єкта визначаються таким чином:

$$A = 1/8n(SQ1)+1/4n(SQ2)+7/8n(SQ3)+n(SQ4)+4n(SQ5) \quad (8)$$

$$P = n(SQ2)+1/\sqrt{2}[(SQ1)+m(SQ3)] \quad (9)$$

$$E = 1/4n(SQ1)-1/4n(SQ3)+1/2n(SQ5) \quad (10)$$

де  $n(i)$  – число елементів  $i$  на зображенні.

За такого підходу можна обчислити середню площу, середній периметр одного елемента зображення, середній коефіцієнт форми, напівосі апроксимуючого еліпса, щільність заповнення зображення (при дослідженні пор це відповідає пористості) та інші характеристики мікроструктури.

У випадку ізотропної розгортки з великим числом піксельного розбиття морфологічний аналіз суттєво спрощується: площа досліджуваного об'єкта визначається як число елементів, що належать до фрагмента об'єкта, на зображенні  $A = n(1)$ ; периметр  $P$  можна обчислити за спрощеною формулою:

$$P = 2[n(01) + n(0/1)] \quad (11)$$

яка відповідає подвоєному числу перетинів ліній з границями досліджуваної фази очистки об'єкта.

Число окремих компонент досліджуваного фрагменту  $E$  при великому числі аналізованих точок на зображенні можна обчислювати без врахування групи точок ( $SQ5$ ), тобто:

$$E = 1/4n(SQ1)-1/4n(SQ3) \quad (12)$$

Програмна реалізація стереолого-морфологічного аналізу РЕМ-зображень здійснена ПП «Stiman» [5].

### Результати та їх обговорення

З метою практичної апробації методології стереолого-морфометричного аналізу РЕМ-зображень були досліджені типові зразки чорноземних і дерново-підзолистих ґрунтів, РЕМ-зображення яких показано на рис. 4. РЕМ-дослідження здійснювалися на сучасному растровому електронному мікроскопі «НІТАСНІ S-800» (МДУ, м. Москва).

Для суттєвого збільшення генеральної вибірки в дослідженнях порового простору необхідно здійснювати РЕМ-знімання при декількох збільшеннях. В РЕМ є можливість плавно змінювати збільшення в діапазоні  $20^X - 10000^X$ . За спеціально розробленою програмою [5; 7], яка є складовою частиною ПП «Stiman», здійснюється об'єднання в одну генеральну вибірку усіх помірних пор (частинок) і побудова інтегральної гістограми їх розподілу [17]. Вказана методика детально викладена в роботах [5; 7]. В подальшому обмежимося РЕМ-морфометричним аналізом чорноземних зразків.

Всього було проаналізовано 6 проб, мікроструктуру будову пор і твердої фази ґрунту орних шарів

вивчали в шліфах вертикальної орієнтації, відібраних з горизонтів 0 – 5, 5 – 15, 15 – 25 см. Всі зразки проаналізовані за повною програмою морфометричної оцінки, тобто з обчисленням і побудовою гістограмного розподілу за еквівалентними діаметрами, сумарною площею, периметрами, фактором форми та «розою» орієнтації.

На рисунку 5, як приклад, приведені гістограми розподілу за еквівалентними діаметрами, площею та «розою» орієнтації.

Для покращення наочності та спрощення аналізу, окрім гістограмних ілюстрацій, передбачена можливість побудови діаграм Варзара, приклади яких наведено на рисунку 6 [3; 17].

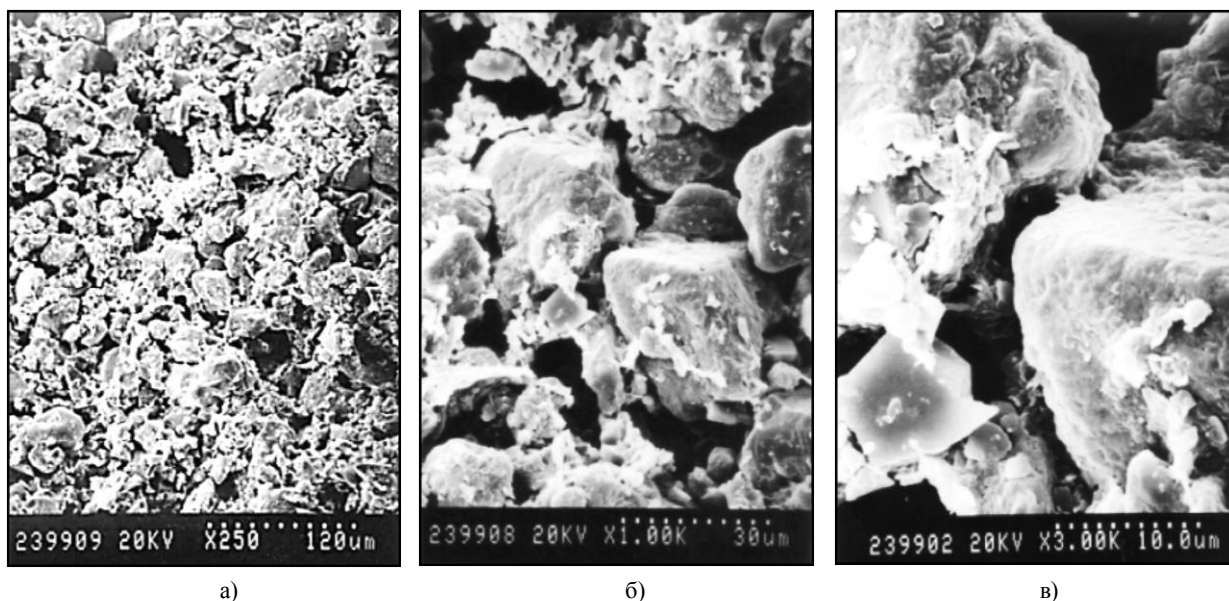


Рис. 4. Мікроструктура зразків чорнозему опідзоленого легкосуглинкового а)  $250^X$ ; б)  $1000^X$ ; в)  $3000^X$ , РЕМ «НІТАСНІ S-800»

Дамо короткий аналіз отриманих результатів. Мікроструктура досліджуваних зразків слабо анізотропна, переважна орієнтація має вертикальний напрямок [18; 19]. Це, за дослідженнями О.Б. Скворцової [1;2], в цілому відповідає ґрунтам, що піддаються інтенсивному режиму змиву. Мікроструктуру будову можна вважати скелетного типу (зразок № 1) або скелетно-матричного комірчастого типів (зразок № 2) [3]. Результати кількісного аналізу порового простору свідчать про те, що зразок № 1 дещо більш пористий, ніж зразок № 2 (пористість відповідно № 1  $\cong 31,16\%$  і № 2  $\cong 37,089\%$ ). Об'ємна пористість приблизно 40%. Обидва зразки погано фільтрують воду, оскільки у них фільтраційний коефіцієнт не перевищує 0,0775 мД. Поровий простір в обох зразках складений декількома категоріями пор. Графіки розподілу пор за еквівалентними діаметрами і площами є подібними. Для зразка № 1 найбільш багаточисельними є пори з діаметром 0,28-1,2 мкм, далі 1,2-17 мкм і небагаточисельні 17-49 мкм. У відсотковому співвідношенні вони складають лише 1%. Проте саме крупні, але менші за кількістю пори визначають фільтраційні властивості та реакції на зовнішні дії. Для зразка № 2 характерні 3 категорії пор: 1 – багаточисельні, але дрібні 0,26-1,55 мкм; 2 – 1,55-12 мкм; 3 – 12-63 мкм. Третя категорія складає 44%, а перша – 10%. В цілому зразок № 2 більш

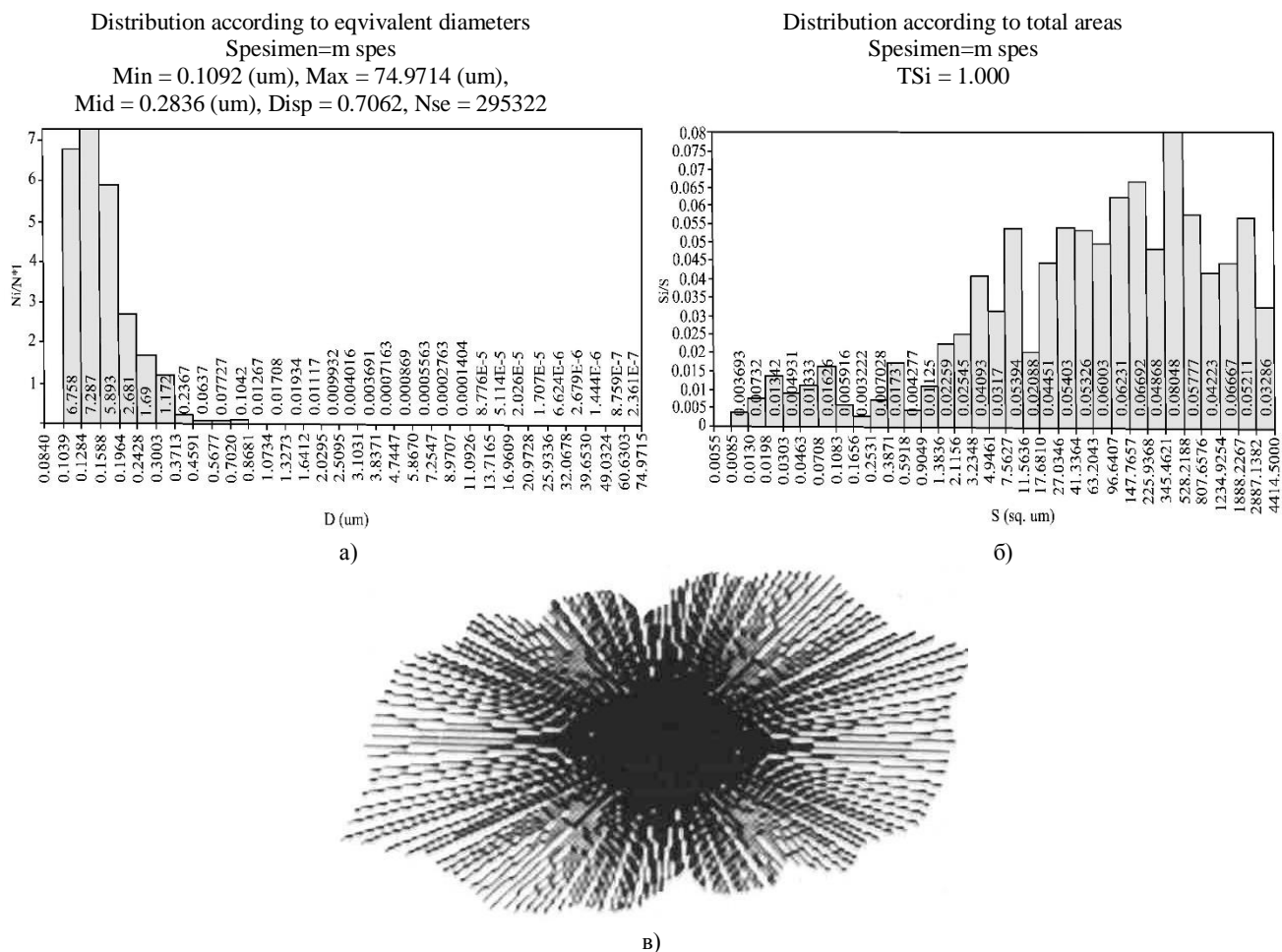
дисперсний і містить більше глинистих частинок. Форма пор: в зразку № 1 переважають пори анізотричної форми (фактор форми  $K_f \cong 0,395-0,549$ ), в той же час як в зразку № 2 є анізотричні мікроагрегатні пори та анізотричні міжзернові пори  $K_f \cong 0,52-0,559$ .

Зведені РЕМ – морфометричні результати аналізу наведено в таблицях 1 та 2.

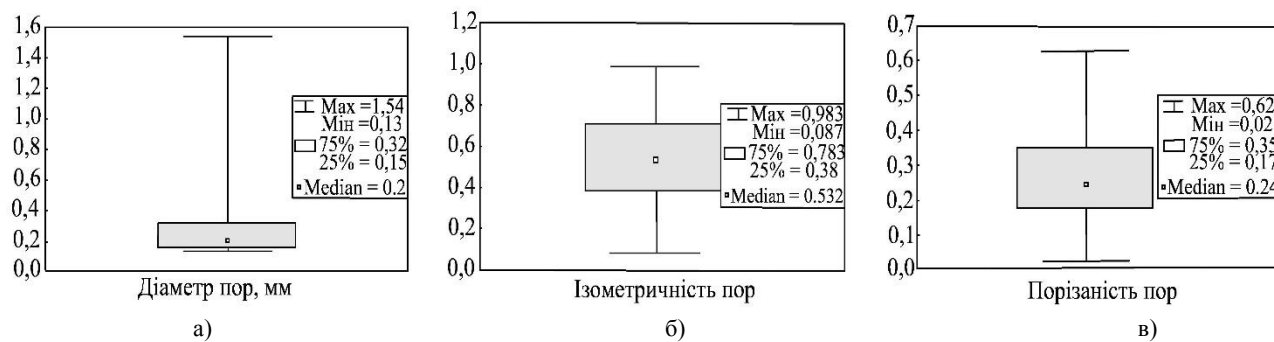
За діаграмами Варзара (рис. 6) можна зробити однозначний висновок, що більші пори мають і більш округлу форму. Це підтверджується і збільшенням показника ізометричності з 0,087 до 0,983 при збільшенні еквівалентного діаметра пор (рис. 6б). Поровий простір характеризується значною мінливістю, про що свідчать дані розподілу еквівалентних діаметрів пор і показники ізометричності.

В профілі досліджуваних зразків чітко прослідковуються ознаки текстурної диференціації.

Скелетна мікроструктура ґрунту горизонту 0 – 5 см характеризується значеннями загальної пористості близько 41%. Максимальний внесок складають міжзерністі мезопори, потім міжмікро – агрегатно – зерністі гребі і середні мікропори. Найменш в поровому просторі присутні тонкі мікропори, що розташовуються між зернами дрібнопилюватої фракції і глинистими ультрамікроагрегатами.



**Рис. 5.** Гістограми розподілу пор: а) за еквівалентними діаметрами; б) за загальною площею; в) «роза» орієнтації



**Рис. 6.** Результати статистичної обробки даних: а) за еквівалентними діаметрами макро – і мезопор; б) за ізометричністю макро – і мезопор; в) за фактором форми.

**Таблиця 1.** Зведені результати структурного аналізу Збільшення (M) та розмір елемента розбиття (L)

M	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	32000
L, мкм	1,38	0,69	0,34	0,17	0,09	0,04	0,02	0,01

Кількість пор	194525
Пористість, %	31,18
Загальна площа пор (кв.мкм)	24797,4
Загальний периметр пор (мкм)	197900
Середній діаметр (мкм)	0,166832
Середня площа (кв.мкм)	0,127477
Середній периметр (мкм)	1,01735
Питома поверхня (1/мкм)	1,5972
Фільтраційний коефіцієнт (мД)	0,0775216



Таблиця 2. Морфометричні показники зразків ґрунту (чорнозем)

№ зразка	№ проби	Кількість пор, $N$	Характерні діаметри, мкм			Загальна площа $S_{заг}$ мкм <sup>2</sup>	Пористість, %	$K_a$ , %	$K_f$
			$D_{mid}$	$D_{max}$	$D_{min}$				
Зр.№1	$m_1$	9327	0,911	46,31	0,28	28707	28,18	5,6	0,395
	$m_2$	17430	0,737	38,07	0,26	28388	26,86	11	0,418
	$m_3$	30388	0,364	49,23	0,13	29987	38,43	4	0,549
Середнє значення		15715	0,663	44,54	0,22	29027	31,16	6,86	0,454
Зр.№2	$m_{18}$	18017	1,182	57,8	0,54	103765	35,8	31,4	0,559
	$m_{19}$	27890	0,354	39,74	0,13	25294	38,19	3,8	0,556
	$m_{20}$	43174	0,291	63,14	0,14	31428	39,68	8,7	0,52
Середнє значення		29694	0,609	5356	0,27	53496	37,089	14,6	0,545

**Висновки і перспективи подальших досліджень**

1. Розроблена методологія і методика кількісного стереолого-морфологічного аналізу РЕМ-зображень дисперсних ґрунтів. Виконані експериментальні дослідження чорноземних зразків. Розроблена методика є оригінальною і може бути застосована, окрім ґрунтів, до більш широкого класу дисперсних матеріалів.

2. За кількісними стереологічними параметрами (еквівалентних діаметрів, площ, периметрів тощо) можна оцінювати фільтраційні властивості ґрунтів. Така концепція є новаторською і потребує більш ґрунтовних досліджень, зокрема в теоретичному плані оптимізації застосування вейвлет-перетворень і математичного апарату дискретних осей Вороного, як високо коректних і перспективних методів.

**ЛІТЕРАТУРА**

- [1] Скворцова Е.Б. Микроморфометрические типы строения порового пространства целинных и пахотных суглинистых почв / Е.Б. Скворцова, Н.В. Килинина // Почвоведение. – 2004. – №9. – С. 1114–1125.
- [2] Скворцова Е.Б. Строение порового пространства в подзолистых горизонтах суглинистых почв (анализ 2D и 3D изображений) / Е.Б. Скворцова, К.М. Герке, Д.В. Корост, К.Н. Абросимов // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2013. – Вып. 71. – С. 65–79.
- [3] Kyzlassov I. Image analysis of illuvial horizons / I. Kyzlassov, S.A. Shoba, V.N. Sokolov // Proceeding 12 European congress on electron microscopy. – 2000. – Edited by L. Franc and F. Ciampor. – P. 1399–1400.
- [4] Соколов В.Н. Метод количественного анализа микроструктуры твердых тел по РЭМ изображениям / В.Н. Соколов, Д.И. Юрковец, О.В. Разгулина, В.Н. Мельник // Зав. лаб. – 1997. – №9, Т.63. – С. 5–35.
- [5] Мельник В.М. Растрово-електронна стереомікрофрактотрофія: Монографія [Текст] / В.М. Мельник, А.В. Шостак. – РВВ «Вежа» ВНУ ім. Лесі Українки, Луцьк, – 2009. – 469 с. – ISBN 978-966-1532-01-3.
- [6] Гоулдстейн Дж. Практическая растровая электронная микроскопия // Дж. Гоулдстейн, Х. Яковиц. – М.: Мир, 1979. – 655 с.
- [7] Соколов В.Н. Автоматизированная система морфологического анализа / В.Н. Соколов, Д.И. Юрковец, В.Н. Мельник // Поверхность: рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2002. – №10. – С. 66–69.
- [8] Балалаев А.К. Эколого-микроморфологическая оценка эдафотопов лесных экосистем Степного Приднепровья (состояние, охрана, прогноз): автореф. дис. канд. биол. наук: 03.00.16 / Балалаев А.К. – Днепропетровск, 2005. – 24 с.
- [9] Misiti, Y. MATLAB – Wavelet Toolbox Unser's Guide / Y. Misiti, G. Oppenheim Misiti // J. – M. Poggi. Natick, MA, USA: The MathWorks Inc., 2000. – Version 2 (release 12).
- [10] Gackenheim, C. Analysis of scanning probe microscope images using wavelet / C. Gackenheim, L. Cayon, R. Reifengerger // Ultramicroscopy. – 2006. – No. 4-5, Vol. 106. – P. 389–397.
- [11] Orgniewicz, R.L. DcreteVoronoi Skeletons / R. L. Orgniewicz – Zurich, 1992. – 208 p.
- [12] Skrypnyk, I.D. Modeling of the surface microcracking in high density polyethylene due to ultraviolet – degradation / I.D. Skrypnyk, J.L. Spoomaker // Phys. Mech. Mat. – 1999. – No. 4. – P. 73–78.
- [13] Ярмоленко А.С. Использование вейвлетов в аналитическом представлении дискретных функций графической информации / А.С. Ярмоленко // Изв. Вузов. – 2008. – №3. – С. 20–30.
- [14] Герке К.М. Томографический метод исследования порового пространства почв: состояние проблемы и изучение некоторых почв России / К.М. Герке, Е.Б. Скворцова, Д.В. Корост // Почвоведение. – 2012. – №7. – С. 781–791.
- [15] Sergeev, V. Quantitative morphological analysis in a SEM – microcomputer system – J. Quantitative shape analysis of single objects / V. Sergeev, V. Sokolov // J. of microscopy. – 1984. – V. 135, Pt. 1. – P. 1–12.
- [16] Serra, J. Image Analysis and Mathematical Morphology / J. Serra. – London: Academic Press., 1982. – 610 p.
- [17] Корн Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн – М.: Наука, 1970. – 720 с.
- [18] Седов С.В. Методы исследования минерального скелета почв: оценка возможностей, применение к решению почвенногенетических задач / С.Н. Седов, С.А. Шоба // Почвоведение. – 1996. – №10. – С. 1157–1166.
- [19] Травлев А.П. Экология почвообразования лесных черноземов / А.П. Травлев, Н.А. Белова, А.К. Балалаев // Грунтознавство. – 2008. – Т.9., №1–2. – С. 19–29.

**REFERENCES**

- [1] Skvortsova, E.B. Micromorphometrical types of pore space structure of unbroken and cultivated clay-loam soils / E.B. Skvortsova, N.V. Kilinina // Pochvovedenie. – 2004. – №9. – P. 1114–1125.
- [2] Skvortsova, E.B. The structure of the pore space in podzolic horizons of clay-loam soils (the analysis of 2D and 3D images) / E.B. Skvortsova, K.M. Gerke, D.V. Korost, K.N. Abrosimov // Bulletin of Soil Institute named after V.V. Dokuchaev. – 2013. – Is. 71. – P. 65–79.
- [3] Kyzlassov, I. Image analysis of illuvial horizons / I. Kyzlassov, S.A. Shoba, V.N. Sokolov // Proceeding 12 European congress on electron microscopy. – 2000. – Edited by L. Franc and F. Ciampor. – P. 1399–1400.
- [4] Sokolov, V.N. Method of quantitative analysis of the microstructure of solids by REM images / V.N. Sokolov, D.I. Yur-

- kovets, O.V. Razgulina, V.N. Mel'nik // *Zav. lab.* – 1997. – № 9, Vol. 63. – P. 5-35.
- [5] Melnyk, V.M. Raster electron stereo micro-phractography: Monografiya [Tekst] / V.M. Melnyk, A.V. Shostak. – RVV «Vezha» VNU im. Lesi Ukrayinky, Lucz'k, – 2009. – 469 p. – ISBN 978-966-1532-01-3.
- [6] Goldstein, J. Practical scanning electron microscopy // J. Goldstein, H. Jakovitz. – M.: Mir, 1979. – 655 p.
- [7] Sokolov, V.N. Computer-aided system of morphological analysis / V.N. Sokolov, D.I. Yurkovets, V.N. Melnik // *Surface: X-ray, synchrotron and neutron research.* – 2002. – №10. – P. 66-69.
- [8] Balalaev, A.K. Ecological-micromorphological evaluation of edafotops of forest ecosystems of Steppe Prydniprovje (state, protection, forecasting): avtoref. dis. kand. biol. sc: 03.00.16 / A.K. Balalaev. – Dnepropetrovsk. 2005. – 24 p.
- [9] Misiti, Y. MATLAB – Wavelet Toolbox Unser's Guide / Y. Misiti, G. Oppenheim Misiti // J. – M. Poggi. Natick, MA, USA: The MathWorks Inc., 2000. – Version 2 (release 12).
- [10] Gackenhaimer, C. Analysis of scanning probe microscope images using wavelet / C. Gackenhaimer, L. Cayon, R. Reifengerger // *Ultramicroscopy.* – 2006. – No. 4 -5, Vol. 106. – P. 389-397.
- [11] Orgniewicz, R.L. DcreteVoronoi Skeletons / R.L. Orgniewicz – Zurich, 1992. – 208 p.
- [12] Skrypnyk, I.D. Modeling of the surface microcracking in high density polyethylene due to ultraviolet – degradation / I.D. Skrypnyk, J.L. Spoomaker // *Phys. Mech. Mat.* – 1999. – No. 4. – P. 73-78.
- [13] Yarmolenko, A.S. The use of wavelets in the analytical representation of the discrete functions of graphic data / A.S. Yarmolenko // *Izv. Vuzov.* – 2008. – №3. – P. 20-30.
- [14] Gerke K.M. Tomographic method of pore space exploration: the state of the problem and the study of some soils of Russia / K.M. Gerke, E.B. Skvortsova, D.V. Korost // *Pochvovedenie (Pedology).* – 2012. – №7. – P. 781-791.
- [15] Sergeev, V. Quantitave morphological analysis in a SEM – microcomputer system – J. Quantitative shape analysis of sing fie objects / V. Sergeev, V. Sokolov // *J. of microscopy.* – 1984. – V. 135, Pt. 1. – P. 1-12.
- [16] Serra, J. Image Analysis and Mathematical Morfology / J. Serra. – London: Academic Press., 1982. – 610 p.
- [17] Sedov, S.V. Research methods of mineral framework: assessment of possibilities, application to the solution of pedogenetic problems / S.N. Sedov, S.A. Shoba // *Pochvovedenie (Pedology).* – 1996. – №10. – P. 1157-1166.
- [18] Korn, H. Guide in Mathematics / H. Korn, T. Korn – M.: Nauka, 1970. – 720 p.
- [19] Travleev, A.P. The ecology of pedogenesis of forest black soils / A.P. Travleev, N.A. Belova, A.K. Balalaev // *Gruntoznavstvo (Soil Science).* – 2008. – T. 9., №1-2. – P. 19-29.

#### **Stereological-stereometrological principles of REM-microscopy of dispersed soil**

**V.N. Melnyk, O.V. Piskunova**

**Abstract.** The article reviewed the methodology of stereological-morphological analysis of REM images of dispersed soils. It is suggested to apply wavelet method for radiometric correction of REM images and mathematical tools of discrete axles by Voronoi to identify the pore space of soil microstructural organization as dispersed systems. We've placed an emphasis on using the original software package «Stiman». Experimental studies given in the article were carried out with the appliance of modern REM (HITACHI S-800, Japan). The obtained results confirm the prospects of stereological-morphological analysis of REM images on micron and submicron levels.

**Keywords:** raster electron microscopy, wavelets, axles of Voronoi, stereology, morphometry

## Дослідження процесу ультрафільтраційного очищення інвертованого бурякового екстракту

О.І. Сизоненко, Ю.Г. Змієвський, І.О. Крапивницька\*, В.Г. Мирончук

Національний університет харчових технологій, Київ, Україна

\*Corresponding author. E-mail: eos\_irina@mail.ru

Paper received 20.03.15; Revised 28.03.15; Accepted for publication 08.04.15.

**Анотація.** Досліджено основні технологічні умови проведення ультрафільтраційного очищення інвертованого бурякового екстракту на установці непроточного типу та мембранах УПМ-10 та УПМ-50. Встановлено, що для очищення інвертованого бурякового екстракту від несахарів раціонально використовувати мембрану УПМ-10, тому що у порівнянні з мембраною УПМ-50 вона має вищу селективність за сухими речовинами на 29-34 % та за білком на 5,5-6,4 %, при незначній різниці зниження продуктивності мембрани під час процесу очищення.

**Ключові слова.** ультрафільтрація, інвертований буряковий екстракт, сахароза

**Вступ.** Активне впровадження мембранних процесів в харчову промисловість пов'язано з можливістю розділяти розчини на молекулярному рівні, зберігаючи при цьому нативний стан цінних компонентів. Найбільш поширені баромембранні процеси: мікро-, ультрафільтрація, зворотній осмос, рушійною силою яких є різниця тиску. У цукровій промисловості ці технології практично не застосовуються, що пов'язано з великими обсягами виробництва та недостатньою кількістю наукових досліджень у цій області. Однак, відомі роботи, в яких описано, як ультрафільтрацією очищали від нецукрів дифузійні соки, отримані, як з тростини [1, 2], так і цукрового буряка [3-5]. Це дозволило знизити кольоровість і каламутність розчинів до 60 і 78% відповідно [1, 3, 4], при цьому спостерігалася низька селективність

мембран по сахарозі – від 6,74 до 17,68% [2], що робило втрати цільового компонента з концентратом не більшими. Для отримання високого ступеня очищення такого соку, необхідно його обробляти не тільки ультрафільтрацією, але і доочишувати адсорбентами або іонообмінними смолами [1].

Невивченим залишалось застосування ультрафільтрації в технологіях отримання цукрових сиропів, призначених для застосування в харчовій промисловості. Тому метою даної роботи було експериментальне дослідження процесу ультрафільтрації для очищення зазначених розчинів від нецукрів.

**Матеріали і методи.** Параметри вихідного бурякового екстракту представлені в табл.1.

Таблиця 1. Параметри бурякового екстракту перед ультрафільтрацією

Сухі речовини, %	Чистота, %	Концентрація сахарози, %	pH	Кольоровість, од.опт. густ.	Концентрація білків, %
14,5	88,5	13,3	4,7	2922	0,454

Очищення цукрових сиропів здійснювали на баромембранній лабораторній установці непроточного типу з ефективною площею мембран  $1,38 \cdot 10^{-3}$  і  $3,42 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup> на мембранах марок УПМ-10 та УПМ-50 виробництва ПАТ НТЦ «Владіпор» (Російська Федерація). Установа має теплову сорочку, в яку подається з термостата дистильована вода із заданою температурою. Їх принцип дії детально описаний у роботі [6]. Температура розчинів при проведенні першої серії експериментів (залежність питомої продуктивності і селективності мембран від тиску) була в межах  $20 \pm 3^\circ\text{C}$ .

**Розрахункові формули.** Питому продуктивність  $J$  (дм<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·год)) і селективність  $R$  (%) мембран розраховували за наступними формулами [7]:

$$J = \frac{3600 \cdot V}{S \cdot \tau} \quad (1)$$

де  $V$  – об'єм очищеного розчину (пермеату), дм<sup>3</sup>, одержуваний за час  $\tau$ , с;  $S$  - ефективна площа мембрани, м<sup>2</sup>.

$$R = \left( 1 - \frac{C_p}{C_r} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

де  $C_p$ ,  $C_r$  - вміст компоненту в пермеаті та концентрації відповідно, г/дм<sup>3</sup>.

**Результати і обговорення.** Полімерні мембрани в перші години роботи під дією тиску ущільнюються, що призводить до зниження їх питомої продуктивності.

Щоб це явище не відбивалося на кінцевих результатах, нові мембрани були відпресовані протягом 2 год шляхом фільтрування крізь них дистильованої води при тиску 0,8 МПа. Далі в установку заливали 100 мл соку і встановлювали в камері необхідний тиск. Для стабілізації потоку пермеата, перші 5 мл зливали, далі відбирали 6 проб по 5 мл, заміряючи час відбору кожної проби. Розраховували питому продуктивність мембран за формулою 1, на графіках зображували середнє значення. Далі сік зливали, установку промивали дистильованою водою і 2% розчином лимонної кислоти, після чого заливали нові 100 мл соку і продовжували дослідження згідно з планом.

На першому етапі досліджень використовували дві ультрафільтраційні мембрани (УПМ-10 та УПМ-50) з різною відсікаючою здатністю за молекулярною масою (10 і 50 кДа відповідно). На рис. 1 представлена залежність їх питомої продуктивності від тиску.

Видно, що для мембрани УПМ-50 максимальний потік пермеата спостерігався при 0,3 МПа, а для УПМ-10 він залишався незмінним у всьому дослідженому діапазоні тисків. У першому випадку мембраною затримувалися фракції крупніше розміром, які формували більш "пухку" динамічну мембрану, що на першому етапі призводило до підвищення  $J$  пропорційно рушійній силі. Однак, більш високі значення тиску (0,5 МПа і вище) скоріше всього сприяли ущільненню динаміч-

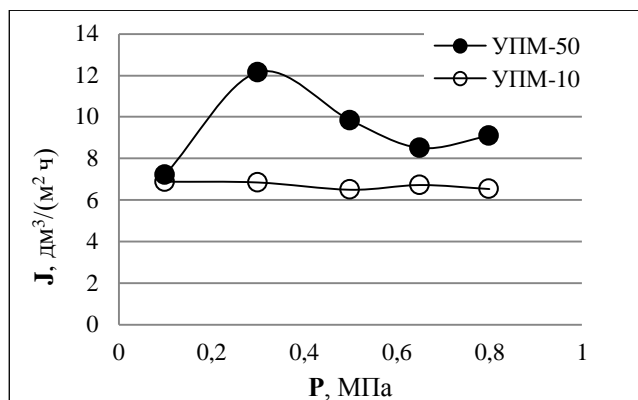


Рис. 1. Залежність питомої продуктивності мембран УПМ-10 та УПМ-50 від тиску.

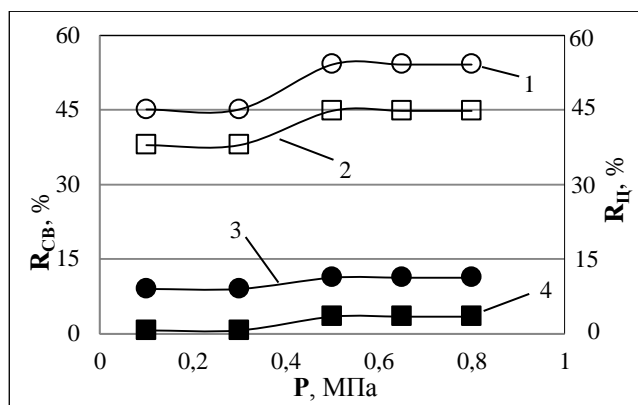


Рис.2. Залежність селективності мембран УПМ-10 (прозорі символи) і УПМ-50 (суцільні символи) за сухим речовинам (R<sub>св</sub>) (2 і 4) і сахарозі (R<sub>ц</sub>) (1 і 3) від тиску.

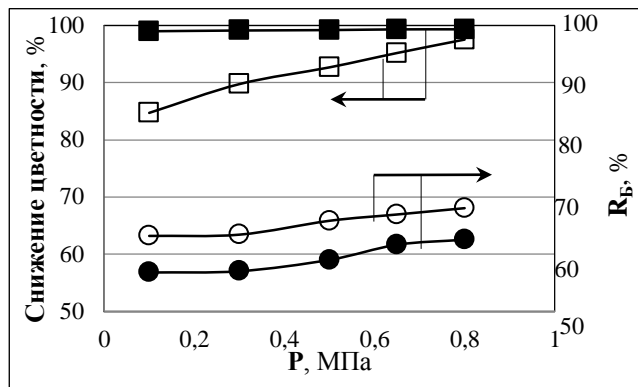


Рис. 3. Залежність зміни кольоровості соку цукрових буряків після ультрафільтрації та селективність по білковим з'єднанням (R<sub>Б</sub>) мембран УПМ-10 (прозорі символи) і УПМ-50 (суцільні символи) від тиску.

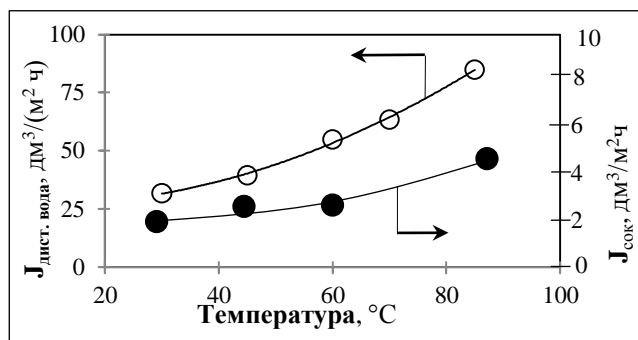


Рис. 4. Залежність питомої продуктивності мембрани УПМ-10 при ультрафільтрації дистильованої води і соку цукрового буряка. Тиск 0,1 МПа.

ної мембрани і можливо в якійсь мірі – полімерної. Для кожного тиску встановлювалася динамічна рівновага, коли кількість розчинених речовин, що підводяться до мембрани конвективним потоком, дорівнювала кількості речовин дифундуючих від її поверхні. Ущільнення динамічної мембрани в цих випадках відбувалася в перші хвилини експерименту у зв'язку із збільшенням рушійної сили і відповідно потоку в бік розділюючої перегородки. Можна припустити, що такі явища характерні і для мембрани УПМ-10. Однак, в цьому випадку біля мембрани накопичувалися фракції менших розмірів, які формували більш щільний динамічний шар. В обох, описаних вище, припущеннях не можна також відкинути можливе часткове закупорювання пор, що достатньо характерно для процесу ультрафільтрації.

Із рис. 2 та 3 видно, що для обох мембран селективність по сухим речовинам, сахарозі і білкам збільшувалася при 0,5 МПа, що також підтверджує ущільнення динамічного шару.

УПМ-50 затримує незначну частину сухих речовин, що може негативно позначатися на якості кінцевого продукту, незважаючи на те, що втрати сахарози з концентратом будуть мінімальні ( $R_{ц} = 9,02-11,28\%$ ). Зниження кольоровості пермеату порівняно з вихідним розчином, на перший погляд, має аномальний характер, тому що мембрана УПМ-10 затримує більшу кількість, як білкових сполук, так і сухих речовин в цілому. Пояснити такі результати можна таким зразком. Цей показник для пермеату, отриманих при поділі соку мембраною УПМ-50, визначали практично відразу після експерименту, в той час, як для пермеату після УПМ-10 - тільки через добу. Через такий проміжок часу спостерігалася помутніння пермеату після УПМ-50, що свідчить про окисленні різного роду несахаров. Слід зазначити, що обидві мембрани не здатні забезпечити повну очистку розчину від баластних сполук. З двох мембран краще справляється з цим завданням УПМ-10, незважаючи на більшу кількість сахарози, яка буде залишатися в концентраті. Цю проблему можна вирішити шляхом застосування діалізації [8] або використовувати отриманий концентрат для виробництва етанолу [9].

Одним із способів зниження енерговитрат на етапі згущення бурякового екстракту, очищеного ультрафільтрацією, є застосування зворотного осмосу [10], що дозволяє не тільки підвищити концентрацію сухих речовин, а й знизити більш ніж на 30 % витрати енергії [11], споживаної при згущенні. Таким чином, необхідно враховувати не тільки якість продукту, одержаного після ультрафільтрації, а й способи його подальшої обробки.

На рис. 4 представлена залежність питомої продуктивності від температури для дистильованої води і соку цукрового буряка. Обидві лінії мають однаковий характер. Величина  $J_{сик}$  практично в 10 разів менше, ніж  $J_{дист. вода}$ , що пов'язано з наявністю значної кількості розчинених речовин в соці (14,5 % сухих речовин). Як вже зазначалося, питома продуктивність з підвищенням температури збільшується в результаті зниження в'язкості розчину.

Фізико-хімічні показники бурякового екстракту після ультрафільтрації при різних температурах представлені в табл. 2.

**Таблиця 2.** Фізико-хімічні показники бурякового екстракту після ультрафільтрації при різних температурах

Температура, °С	Сухі речовини, %	Концентрація сахарози, %	Кольоровість, од. опт. густ.	Концентрація білків, %
30	9	7,5	40,25	0,167
45	9	7,5	40,3	0,166
60	9	7,5	63,85	0,155
85	9	7,5	87,06	0,15

Встановлено, що селективність по сухим речовинам і сахарозі не змінюється при нагріванні соку і дорівнює 37,93 і 43,61 % відповідно, відсоток зниження кольоровості зменшується від 98,62 до 97,02 %, селективність по білках збільшується від 63,22 до 66,96 % при підвищенні температури від 30 до 85°C. Це можна пояснити денатурацією білкових та інших органічних сполук під дією температури, що призводить до зміни їх фізико-хімічних властивостей і розмірів. Температура, яка перевищує 60°C також сприяє руйнуванню молекул сахарози, що може призвести до її додаткових втрат. Тому раціонально екстракт цукрового буряка розділяти ультрафільтрацією при температурі 60°C.

### Висновки

1. Встановлено, що при очистці ультрафільтрацією максимальне значення питомої продуктивності для мембран УПМ-50 досягається при 0,3 МПа і складає 12,2 дм<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·год), а для мембран УПМ-10 питома продуктивність с підвищенням тиску не змінюється і знаходиться на рівні 6,7 дм<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·год).
2. Для очищення інвертованого пектинового екстракту від несахарів раціонально використовувати мембрану УПМ-10, тому що у порівнянні з мембраною УПМ-50 вона має вищу селективність за сухими речовинами на 29-34 % та за білком на 5,5-6,4 %.

### REFERENCES

- [1] Hamachi, M., Gupta, B.B., Ben Aim, R. Ultrafiltration: a means for decolorization of cane sugar solution // Separation and Purification Technology. – 2003. – V. 30. – P. 229-239.
- [2] Bhattacharya, P.K., Agarwal, S., De, S., Rama Gopal, U.V.S. Ultrafiltration of sugar cane juice for recovery of sugar: analysis of flux and retention // Separation and Purification Technology. – 2001. – V. 21. – P. 247-259.
- [3] Seres, Z., Gyura, J., Eszterle, M., Djuric, M. Separation of non-sucrose compounds from syrup as a part of the sugar-beet production process by ultrafiltration with ceramic membranes // European Food Research and Technology. – 2006. – V. 223, № 6. – P. 829-835.
- [4] Hakimzadeh, V., Razavi, S.M.A., Piroozifard Mir Kh., Shahidi M. The potential of microfiltration and ultrafiltration process in purification of raw sugar beet juice // Desalination. – 2006. – V. 200. – P. 520-522.
- [5] Loginov, M., Loginova, K., Lebovka, N., Vorobiev, E. Comparison of dead-end ultrafiltration behaviour and filtrate quality of sugar beet juices obtained by conventional and “cold” PEF-assisted diffusion // Journal of Membrane Science. – 2011. – V. 377. – P. 273-283.
- [6] Myronchuk, V.G., Grushevskaya, I.O., Kucheruk, D.D., Zmievskii, Yu.G. Experimental study of the effect of high pressure on the efficiency of whey nanofiltration process using an OPMN-P membrane // Petroleum Chemistry. – 2013. – V. 53(7). – P. 439-443.
- [7] Kilduff, J., Weber, W.J. Transport and separation of organic macromolecules in ultrafiltration processes // Environmental Science Technology. – 1992. – V. 26. – P. 569-577.
- [8] Duarte, R.M.B.O., Santos, E.B.H., Duarte, A.C. Comparison between diafiltration and concentration operation modes for the determination of permeation coefficients of humic substances through ultrafiltration membranes // Analytica Chimica Acta. – 2001. – V. 442. – P. 155-164.
- [9] Kawa-Rygielska, J., Pietrzak, W., Regiec, P., Stencel, P. Utilization of concentrate after membrane filtration of sugar beet thin juice for ethanol production // Bioresource Technology. – 2013. – V. 133. – P. 134-141.
- [10] Goncharuk, V.V., Osipenko, V.O., Balakina, M.N., Kucheruk, D.D. Water purification of nitrates by low-pressure reverse osmosis method // Journal of Water Chemistry and Technology. – 2013. – V. 35 (2). – P. 71-75.
- [11] Madaeni, S.S., Zereski, S. Energy consumption for sugar manufacturing. Part I: Evaporation versus reverse osmosis // Energy Conversion and Management. – 2010. – V. 51(6). – P. 1270-1276.

### Investigation of main technological conditions of the ultrafiltration purification of inverted beet extract

**O. Syzonenko, Yu. Zmievskii, I. Krapyvnytska, V. Myronchuk**

**Abstract.** The main technological conditions of the ultrafiltration purification of inverted beet extract were investigated. Studies were conducted on the installation of periodic process with membranes of the types UPM-10 and UPM -50. Usage of membrane UPM-10 is better than membrane UPM-50 because the first one has a higher selectivity for solid substances by 29-34% and for the protein by 5,5-6,4% with negligible difference in reduced productivity of the membrane during the process of purification.

**Keywords:** ultrafiltration, inverted beet extract, sucrose

## Способи нормалізації інтерферограми білого світла для реконструкції профілю поверхні

Б.І. Стадник, А.В. Хома\*

Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

\*Corresponding author. E-mail: avkhoma@gmail.com

Paper received 22.05.15; Revised 27.06.15; Accepted for publication 30.06.15.

**Анотація.** У статті показано можливість підвищення точності реконструкції профілю поверхні шляхом нормалізації інтерферограми білого світла. Для проведення нормалізації необхідно визначити огинаючу сигналу інтенсивності. Розроблено два способи оцінювання огинаючої. Метрологічні властивості запропонованих способів досліджувалася шляхом моделювання інтерферограми для похилої та сферичної поверхні.

**Ключові слова:** інтерферометрія білого світла, математична модель інтерферограми, несуча та огинаюча сигналу інтенсивності, нормалізація інтерферограми, реконструкція профілю поверхні, зведена похибка реконструкції.

**Вступ.** Інтерферометричні безконтактні вимірювання тривимірної форми або профілю об'єкта є важливим у багатьох сферах, зокрема у медицині, експрес контролі форми деталей, при реконструкції топології складних поверхонь [1]. З урахуванням досягнення комп'ютерних технологій відкривається можливість автоматизації процесу вимірювання та опрацювання інтерферограм. Це спрощує використання цієї технології, розширює сфери її застосування завдяки підвищенню ефективності та можливості опрацювання в реальному часі [2, 3].

У задачах дослідження поверхні інтерферометрія білого світла має низку переваг, зокрема забезпечує можливість реконструкції сходинчастих поверхонь та поверхонь зі значною кривизною [4, 5]. Проте, порівняно із класичною монохроматичною інтерферометрією реконструкція є складнішою, через наявність амплітудної модуляції [5].

На цей час існує багато методів опрацювання інтерферограми білого світла, зокрема визначення максимальної інтенсивності інтерферограми, прямої фазової демодуляції, фазового зсуву, відстеження смуг [6, 7, 8, 9]. Але ефективність цих методів знижується під час реконструкції складних поверхонь (нелінійний, змінний в часі профіль) [3]. Тому актуальним є розроблення нових підходів, які забезпечують покращення метрологічних властивостей методів реконструкції поверхні та є ефективними в реалізації.

**Зміст інтерферометрії білого світла та математична модель інтерферограми.** Оптична інтерферометрія є безконтактним методом визначення профілю поверхні, в основі якого лежить явище інтерференції [4]. У класичному варіанті до складу інтерферометра входить джерело світла, світлоділнийник, опорне дзеркало, досліджувана поверхня та екран [4]. Світлова хвиля від джерела світла розділюється світлоділником на дві хвилі, що прямують до опорного дзеркала та досліджуваної поверхні відповідно. Інтерферометрична картина спостерігається на екрані в результаті накладання хвиль, що відбилися від відповідних поверхонь. Підсилення та послаблення результуючої хвилі спостерігається через оптичну різницю ходу світлових променів.  $\tilde{E}(T)$  – оцінка функції огинаючої.

У загальному випадку математична модель інтерферограми білого світла має вигляд [10]:

$$I(T) = I_0 + E(T) \cdot C(T) \quad (1, a)$$

$$E(T) = I_M \cdot \exp\left(-\frac{4 \cdot \Delta\lambda^2 \cdot T^2}{\lambda_0^4}\right) \quad (\text{огинаюча}) \quad (1, b)$$

$$C(T) = \cos\left(\frac{4 \cdot \pi}{\lambda_0} \cdot T\right) \quad (\text{несуча}) \quad (1, c)$$

де  $I_0$  і  $I_M$  – відповідно стала складова та амплітуда огинаючої сигналу інтенсивності інтерферограми;  $T$  – оптична різниця ходу;  $\lambda_0$  і  $\Delta\lambda$  – центральна довжина хвилі та ширина спектру джерела світла.

Завдання реконструкції полягає у визначенні із сигналу інтенсивності інтерферограми оптичної різниці ходу  $T$ , що пропорційна висоті  $h$  (профілю) досліджуваної поверхні у кожній її точці:

$$h = \frac{T}{v}$$

де  $v$  – коефіцієнт заломлення середовища.

Як видно із рівняння (1), інформативний параметр – оптична різниця ходу  $T$  входить одночасно до виразів огинаючої та несучої. Однак, у разі фазової демодуляції несучої можна досягти вищої чутливості, ніж за амплітудної демодуляції огинаючої. Крім того, частота чи фаза, як інформативний параметр, є стійкішим до впливу завад та шумів. Тому параметр  $T$  доцільно визначати із фази несучої інтерферограми.

**Нормалізація у контексті реконструкції профілю поверхні.** Наявність у інтерферограмі білого світла огинаючої  $E(T)$ , що описується функцією Гауса ускладнює завдання реконструкції профілю поверхні. Для забезпечення інваріантності результатів реконструкції до впливу огинаючої можна застосувати нормалізацію інтерферограми. Суть цього підходу полягає у визначенні форми огинаючої і нормуванні інтерферограми за формулою:

$$I_{norm} = \frac{I(T)}{\tilde{E}(T)} \approx \cos\left(\frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot T\right) \quad (2)$$

$I_{norm}$  – нормований сигнал інтенсивності;  $I(T)$  – сигнал інтерферограми (без сталої складової);  $\tilde{E}(T)$  – оцінка функції огинаючої.

Після унормування інтерферограми оптичну різницю ходу  $T$  можна визначити за формулою:

$$T = \frac{\lambda}{4 \cdot \pi} \cdot \arccos(I_{norm}) \quad (3)$$

Отже реконструкція профілю поверхні з використанням нормалізації інтерферограми білого світла передбачає виконання таких кроків:

- завантаження даних інтерферограми і параметрів інтерферометра;
- вилучення сталої складової  $I_0$ ;
- визначення огинаючої  $\tilde{E}(T)$  інтерферограми;
- нормування сигналу інтенсивності за формулою (2);
- обчислення фази унормованого сигналу інтерферограми на основі функції арккосинус за формулою (3);
- візуалізація реконструйованої поверхні.

Перші чотири кроки стосуються безпосередньо нормалізації. Ключовим у цьому є визначення оцінки огинаючої, яке можна здійснити різними способами. У роботі розглянуто два способи визначення огинаючої сигналу – на основі перетворення Гільберта та інтерполяції.

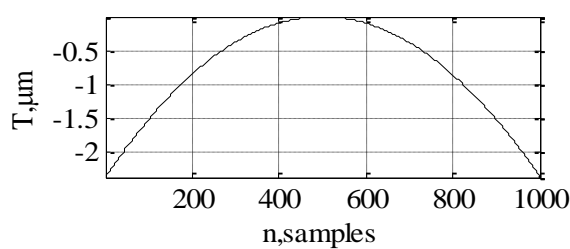
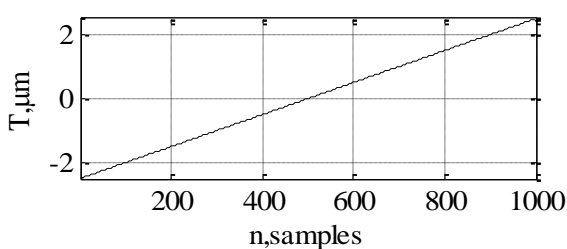


Рис. 1. Профіль досліджуваної поверхні: а – похила, б – сферична

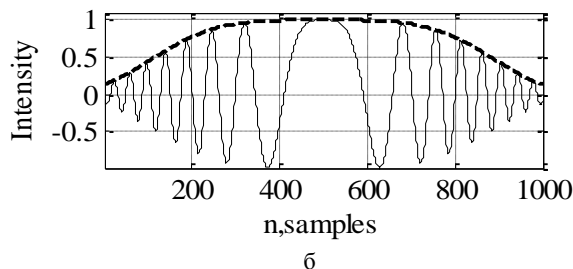
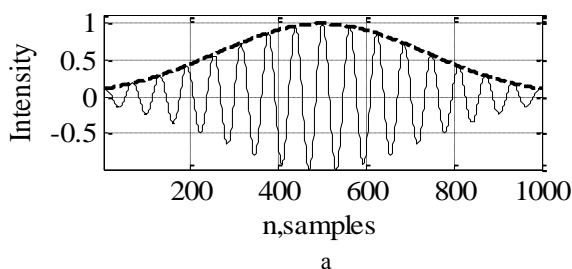


Рис. 2. Сигнал інтерферограми (—) та його огинаюча (---) для похилої (а) та сферичної (б) поверхонь

Метрологічне оцінювання способів визначення огинаючої здійснювалося шляхом обчислення середньоквадратичної зведеної похибки:

$$\sigma_{env} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\tilde{E}_i(T) - E_i(T))^2}}{N \cdot \max[E(T)]} \cdot 100\% \quad (4)$$

де  $E_i$  та  $\tilde{E}_i$  – значення огинаючої та її оцінки у точці  $i$ ;  $N$  – кількість вибірок.

Для оцінювання точності реконструкції обчислювалися зведена та середньоквадратична зведена похибки за виразами:

$$\gamma(T) = \frac{|T_{rec} - T_{origin}|}{\max(T_{origin}) - \min(T_{origin})} \cdot 100\% \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N [T_{rec}(i) - T_{origin}(i)]^2}}{N \cdot [\max(T_{origin}) - \min(T_{origin})]} \cdot 100\% \quad (6)$$

де  $T_{rec}(i)$  – висота реконструйованої поверхні у точці  $i$ ;  $T_{origin}(i)$  – висота оригінальної поверхні у точці  $i$ ;  $N$  – кількість вибірок.

Реалізація та дослідження точності реконструкції профілю поверхні із використанням зазначених способів визначення оцінки огинаючої проводилися у програмному пакеті MATLAB. Методика дослідження передбачала формування даних інтерферограми білого світла на основі математичної моделі (1) та подальшу реконструкцію за описаним алгоритмом. Для глибшого дослідження ефективності обох способів визначення  $\tilde{E}(T)$  було сформовано одновимірну модель інтерферограми (один рядок) для лінійної (похилої) та нелінійної (сферичної) поверхонь (рис. 1).

На рис. 2 наведено вигляд сигналів інтенсивності інтерферограми відповідно для похилої та сферичної поверхонь. Для формування інтерферограми обрано джерело світла із центральною довжиною хвилі -  $\lambda_0 = 620$  нм та відхиленням довжин хвиль (ширина спектру) -  $\Delta\lambda = 62$  нм.

### Визначення огинаючої за допомогою перетворення Гільберта.

Огинаюча сигналу інтерферограми може бути визначена з допомогою перетворення Гільберта [11]. Перетворення Гільберта для деякого дійсного сигналу забезпечує формування його «квадратурного еквівалента» [12]. Іншими словами перетворення Гільберта здійснює фазовий зсув на  $90^\circ$  кожної гармоніки, наявної у спектрі дійсного сигналу.

Для сигналу інтерферограми

$$I(T) = E(T) \cdot \cos\left(\frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot T\right) = E(T) \cdot \cos(\beta \cdot T)$$

перетворення Гільберта формує відповідний квадратурний сигнал  $I_{\perp}(T) = E(T) \cdot \sin(\beta \cdot T)$ . Тоді оцінку огинаючої  $\tilde{E}(T)$  сигналу  $I(T)$  можна обчислити за формулою:

$$\begin{aligned} \tilde{E}(T) &= \sqrt{I^2(T) + I_{\perp}^2(T)} = \\ &= \sqrt{[E(T) \cdot \cos(\beta \cdot T)]^2 + [E(T) \cdot \sin(\beta \cdot T)]^2} = \\ &= \sqrt{E(T)^2 \cdot (\cos^2(\beta \cdot T) + \sin^2(\beta \cdot T))}. \end{aligned} \quad (7)$$

На рис. 3 зображено оцінки огинаючих одержані за допомогою перетворення Гільберта.

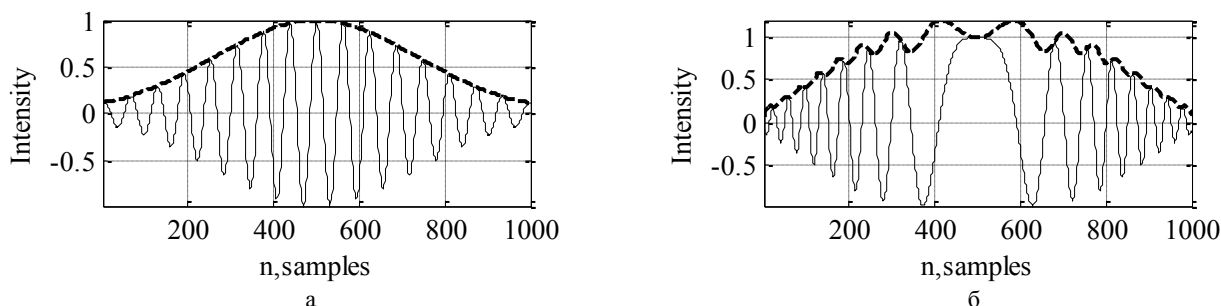


Рис. 3. Оцінка огинаючої за Гільбертом для похилої (а) та сферичної (б) поверхонь

Як видно з рис. 3, а у випадку похилої поверхні огинаюча сигналу, отримана за допомогою перетворення Гільберта практично збігається із ідеальною. Похибка оцінки огинаючої зумовлюється перетіканням спектру, а її середньоквадратичне зведене значення становить 0,21%.

Для сферичної поверхні (рис. 3, б) цей спосіб визначення огинаючої працює не досконало: навіть візуально помітне суттєве відхилення огинаючої «Гільберта» та ідеальної, що зростає у міру наближення до центра

інтерферограми. Було встановлено, що причиною виникнення похибки є накладання спектрів огинаючої та несучої, ефект якого підсилюється у центрі інтерферограми через зменшення частоти несучої. Значення середньоквадратичної похибки складає 8,49%.

Було також досліджено стійкість реконструкції профілю поверхонь до неточності нормування. Залежність зведеної похибки реконструкції від номера вибірки сигналу наведено на рис. 4.

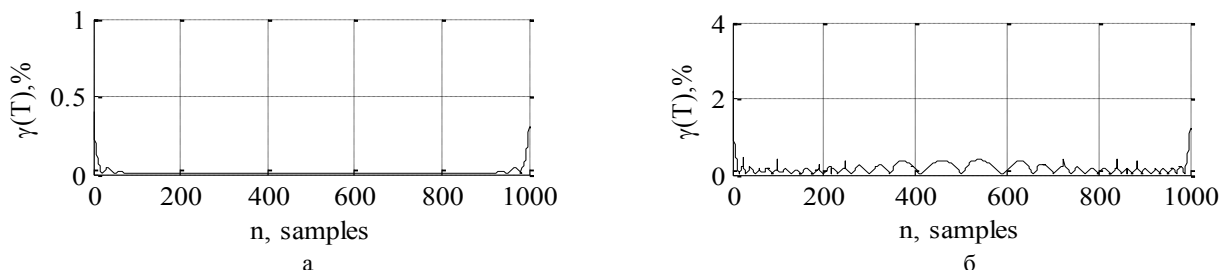


Рис. 4. Зведена похибка реконструкції: а – похила, б – сферична поверхня

Максимальна зведена похибка реконструкції профілю похилої поверхні становить 0,4%, а сферичної – 2,2%, а значення середньоквадратичних зведених похибок складають 0,03% та 0,23% відповідно. Результати досліджень показали стійкість фазової демодуляції та визначення оптичної різниці ходу до неточності оцінки огинаючої (похибка реконструкції на порядок нижча за відповідні похибки оцінки огинаючої).

**Визначення огинаючої шляхом інтерполяції.** Сутність цього способу полягає у визначенні координат екстремальних значень сигналу інтенсивності, що збігаються із точками огинаючої (рис. 2), та застосуванні інтерполяції для знаходження виразу функції оцінки огинаючої.

Знаходження екстремальних точок знакозмінної функції, якою є сигнал інтенсивності з вилученою

сталою складовою, можна звести до пошуку максимумів модуля цієї функції. Визначити координати максимальних точок інтерферограми можна проаналізувавши знак похідної сигналу. Коли функція зростає, знак похідної має додатне значення, а коли спадає – від’ємне. Точки, де похідна змінює свій знак із додатного на від’ємний, і є максимальними точками інтерферограми. Для визначення похідної сигналу можна використати вбудовану функцію MATLAB *diff*(\*).

Інтерполяція реалізована за допомогою вбудованої функції MATLAB *interp1*(\*). Ця функція дає змогу задавати вид інтерполяції (наприклад лінійна, кубічна, spline). Було вибрано spline-інтерполяцію 3-го порядку. Результати використання цього методу для оцінки огинаючої сигналів інтенсивності наведено на рис. 5.

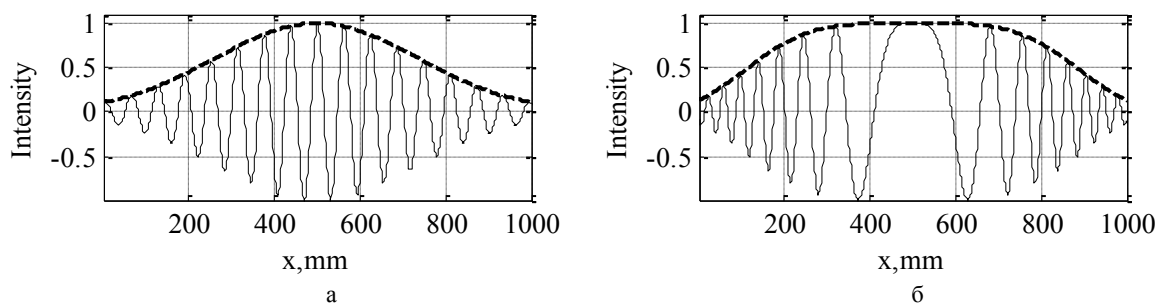
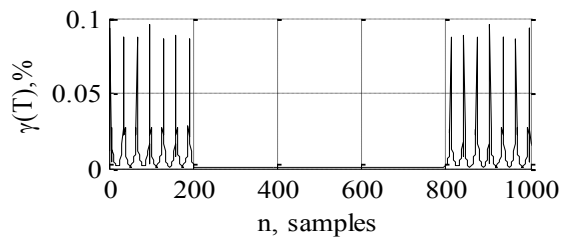


Рис. 5. Результати оцінки огинаючої шляхом інтерполяції: а – похила, б – сферична поверхня



Візуально оцінка огинаючої повністю збігається із огинаючою інтерферограми як для похилої, так і для сферичної поверхонь, причому значення середньоквадратичної зведеної похибки становить 0.09% та 0.086% відповідно. Джерелом похибок цього способу є неточність визначення екстремумів, що



зумовлено обчисленням похідної чисельними методами.

На рис. 6 подано графіки зведених похибок реконструкції профілю досліджуваних поверхонь за нормалізації інтерферограми способом інтерпольованої огинаючої.

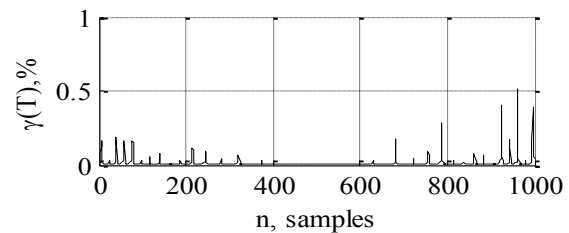


Рис. 6. Зведена похибка реконструкції: а – похила, б – сферична поверхня

Похибки реконструкції профілю поверхонь є меншими порівняно із попереднім способом, особливо у випадку сферичної поверхні. Максимальна зведена похибка реконструкції похилої поверхні становить 0.1%, а сферичної – 0.52%. Значення середньоквадратичних зведених похибок реконструкції складають 0.01% та 0.04% відповідно.

**Висновки.** У роботі проаналізовано можливість застосування методу нормалізації для реконструкції профілю поверхні із інтерферометричної картини білого світла. Цей метод передбачає усунення впливу огинаючої на точність визначення інформативного параметру – оптичної різниці ходу із фази несучої інтерферограми. Для оцінки огинаючої сигналу інтенсивності запропоновано два способи: за допомогою перетворення Гільберта та інтерполяції.

Оскільки перетворення Гільберта базується на алгоритмах швидкого перетворення Фур'є, аналіз його метрологічних властивостей доцільно проводити у частотній області. У випадку похилої поверхні спектри несучої та огинаючої рознесені на осі частот, а наявні похибки оцінювання огинаючої зумовлені перетіканням спектра через неkratність частот дискретизації сигналу та несучої. Оцінка огинаючої нелінійної сферичної поверхні супроводжуються значними похибками, які спричинені накладанням спектрів огинаючої та несучої.

Спосіб оцінювання огинаючої, що базується на інтерполяції точок екстремумів інтерферограми реалізує опрацювання сигналів у просторовій області. Похибки визначення огинаючої менші, ніж у попередньому способі, особливо для сферичної поверхні. Джерелом похибок є обчислення похідної чисельними методами.

## REFERENCES

- [1] Legande-Saenz, R., Rodriguez-Vera, R., Espinosa-Romero, A. Dynamic 3-D shape measurement method based on quadrature transform // Optics Express, Vol. 18, No. 3, P. 2639-2645, 2010.
- [2] Chen, F., Brown, G.M., Song, M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods // Opt. Eng. 39, 2000, P. 10-22.
- [3] Stadnyk, B., Manske, E., Khoma, A. State and prospects of computerized systems monitoring the topology of surfaces, based on white light interferometry // Computational Problems of Electrical Engineering, Vol. 4, No. 1, P. 75-80, 2014.
- [4] Hariharan, P. Basics of Interferometry. 2nd ed. // Elsevier Inc., 2007.
- [5] Wyant, J.C. White light interferometry // in Proc. SPIE, Vol. 4737, P. 98-107, 2002.
- [6] Mingzhou, Li. Development of fringe analysis techniques in white light interferometry for micro-component measurement // Ph.D. thesis, National University of Singapore, 2008.
- [7] Abdul-Rahman, H. Three-dimensional Fourier fringe analysis and phase unwrapping // Ph.D. thesis, Liverpool John Moores University, 2007.
- [8] Muhamedsalih, H.M. Investigation of wavelength scanning interferometry for embedded metrology, Ph.D. thesis, Univ. of Huddersfield, 2013.
- [9] Novak, J. Computer analysis of interference fields using Matlab // MATLAB conference, 2002.
- [10] Seiffert Th. Fast signal preprocessing in the white light by nonlinear signal reception // DGaO-Proceedings, 2004.
- [11] Sang, W. Entwicklung und Implementierung eines Verfahrens zur Auswertung von Weißlichtinterferogrammen zur Bestimmung der dreidimensionalen Oberflächentopographie von Mikro- und Nanostrukturen als Anwendung für eine Nanopositionier- und -messmaschine // Diplomarbeit – Technische Universität Ilmenau, 2006.
- [12] Ifeachor, E.C., Jervis, B.W. Digital signal processing: a practical approach. 2nd ed. // Pearson Education, 2002.

## Methods of white light interferogram normalization for surface profile reconstruction

B.I. Stadnyk, A.V. Khoma

**Abstract.** The article shows the possibility of increasing the accuracy of the surface profile reconstruction by normalizing the white light interferogram. For interferogram normalization, it is necessary to define the envelope of intensity signal. Two methods for envelope evaluation were developed. Metrological properties of the proposed methods were investigated by interferogram simulation for tilted and spherical surfaces.

**Keywords:** white light interferometry, mathematical model of interferogram, normalization, surface profile reconstruction

## Система мировых порогов знаний и ее связи с атрибутами искусственных объектов

Е.В. Шандыба<sup>1\*</sup>, Р.Й. Когут<sup>2</sup>, А.Н. Печеник<sup>3</sup>, Н.Э. Тернюк<sup>4</sup>

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, г. Харьков Украина

Региональная Инспекция Агентства «Укрэнергосбережение», г. Львов, Украина

Региональная Инспекция Агентства «Укрэнергосбережение», г. Киев, Украина

Международная Академия наук и инновационных технологий, г. Киев, Украина

\*Corresponding author. E-mail: ev25@ukr.net

Paper received 17.07.15; Revised 22.07.15; Accepted for publication 28.07.15.

**Аннотация.** Рассмотрена система видов мировых порогов знаний и множество атрибутов искусственных объектов. Установлены иерархические связи между порогами знаний и связи такого же вида между атрибутами. Выявлено структурное соответствие и аддитивный характер зависимостей между информационными, экономическими и временными характеристиками действий, необходимых для реализации жизненного цикла инноваций различных уровней новизны, и видами мировых порогов знаний.

**Ключевые слова:** система, мировые пороги знаний, множество атрибутов, искусственные объекты, жизненный цикл, инновации

**Введение.** Обеспечение лидерных (предельных) значений характеристик изделий и технологий является одной из основных задач разработчиков искусственных объектов. При наиболее общей постановке задачи это предполагает получение информации о мировых порогах знаний. Мировые пороги знаний являются границами между достижениями и пробелами в общих и специальных знаниях. Они дают ориентир для дальнейших поисковых, фундаментальных и прикладных исследований, а также базу для целевых прикладных разработок. Индикаторами достижений в социально-гуманитарных знаниях являются новые идеи, расширяющие существующие мировоззренческие взгляды и подходы, в естественно-научных знаниях – открытия, а в специальных знаниях – продукты прикладных исследований и разработок – изобретения, получившие международное признание. Индикаторами пробелов в знаниях есть проблемы в обществе и среде обитания.

**Постановка проблемы.** Информация о мировых порогах знаний позволяет организовать направленный процесс синтеза новых искусственных объектов в случае, если пороги знаний структурированы и установлены зависимости между их видами и информационными, экономическими и временными характеристиками действий, необходимых для реализации жизненного цикла инноваций различных уровней новизны. В свою очередь, это требует систематизации и классификации порогов знаний, а также изучения их проявления в различных атрибутах на этапах социально-гуманитарного, естественно-научного и научно-технического синтеза при различных путях обеспечения необходимых функциональных свойств объектов.

**Анализ последних публикаций.** Мировые пороги знаний как философская категория упоминаются в ряде работ социально-гуманитарного профиля [1]. Вместе с тем, в существующих публикациях они не привязаны к атрибутам искусственных образований, составляющих объект инновационного развития. Систематика и классификация их видов не выполнена.

В естественных дисциплинах многие пороги знаний определены (скорость света, 1-я, 2-я и 3-я космические скорости, квантовые константы, пределы прочности отдельных материалов и другие) [2, 3, 4].

Однако в публикациях не приведены существующие связи этих видов порогов с порогами других (не физических) видов.

Реализованные и теоретически предсказываемые технические пороги знаний отслеживаются по выставочным образцам научно-технической продукции и результатам патентного, а также научного поиска. Они публикуются в обзорах, отраслевых реферативных сборниках, монографиях, анализируются в диссертациях [5, 6, 7]. Вместе с тем, для технических мировых порогов знаний не существует выделенной структуры атрибутов и не установлены структурные связи этих порогов с общими атрибутами техники и технологий.

**Цель статьи** – рассмотреть систему видов мировых порогов знаний, установить иерархические связи между порогами знаний и связи такого же вида между атрибутами искусственных объектов.

**Система мировых порогов знаний и ее связи с атрибутами искусственных объектов.**

Мировые пороги знаний можно дифференцировать в соответствии со степенью общности знаний, к которым они относятся. Исходя из этого, соподчиненное принципом включения множество видов порогов знаний, используемых при синтезе искусственных объектов, можно представить следующим, упорядоченным по иерархии образом: мировоззренческие, идеальные (философские), вытекающие из естественно-научных знаний (общетеоретические), теоретически достижимые в искусственных объектах и осуществленные в таких объектах.

Мировоззренческий вид порогов знаний является наиболее общим. За ним идет вид идеальных знаний, вытекающих из различных философских систем. Этот вид дифференцируется по типам знаний согласно существующим системам (идеалистическим, материалистическим). Далее во множество входят пороги знаний, которые вытекают из общих естественно-научных знаний (физики, химии, биологии). Они, в рамках типов, могут разделяться на классы порогов, относящиеся к различным научным дисциплинам. Следующими градациями (группами, подгруппами) порогов являются те градации, которые соответствуют характеристикам атрибутов искусственных объектов (технических, биотехнических и т.п.), предсказываемых теоретически (с

учетом ограничений, вытекающих из фундаментальных естественных наук) и практически реализованным. Эти пороги могут классифицироваться по атрибутам в рамках отраслей техники.

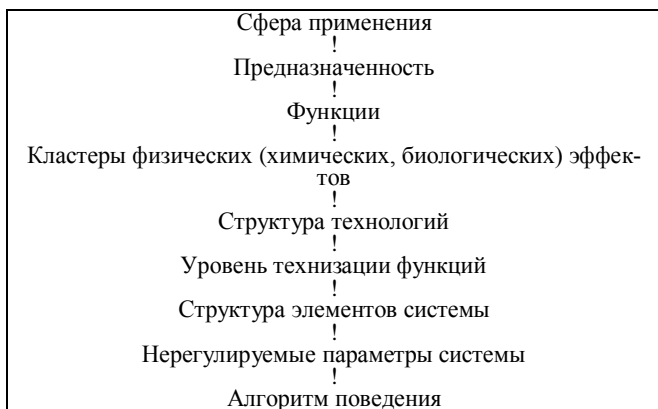


Рис. 1. Схема иерархической классификации атрибутов техники

При решении задач направленного синтеза техники с лидерными характеристиками [8] рационально использовать атрибуты, приведенные на рисунке 1 в виде иерархии [6].

Мировые пороги знаний для этого случая образуют множество  $M_{ij}$ ,  $i \in \{1,2\}$ ,  $j \in \{с, п, ф, к, т, у, э, н, а\}$ , где индексы 1, 2 указывают на отношение порога к теоретически возможным и практически реализованным, а индексы с, п, ф, к, т, у, э, н, а обозначают его принадлежность к сфере применения, предназначенности, функциям, кластерам физических (химических, биологических) эффектов, структуре технологий, уровню технизации функций, структуре элементов системы, нерегулируемым параметрам системы и алгоритму поведения соответственно.

Сравнивая значения порогов  $M_{1j}$  и  $M_{2j}$ , можно определить резервы развития объекта по атрибутам.

Возможности развития зависят от путей обеспечения требуемых функциональных свойств объектов, вариант которых представлен в таблице 1.

Таблица 1. Пути обеспечения требуемых функциональных свойств объектов

№	Путь	Модели	Название
1	Использование системы без переналадки	$\Phi \otimes U_{\phi}$	Управление
2	Использование системы с переналадкой	$[(H \otimes U_n) \otimes (\Phi \otimes U_{\phi})] \otimes U_{нф}$	Переналадка
3	Использование модернизированной системы	$[(D \otimes U_d) \otimes (P \otimes U_n) \otimes (L \otimes U_{лб}) \otimes (I \otimes U_n) \otimes (C \otimes U_c) \otimes (Z \otimes U_z) \otimes (H \otimes U_n) \otimes (\Phi \otimes U_{\phi})] \otimes U_{жц}$	Модернизация
4	Использование новой традиционной системы	$(P \otimes U_n) \otimes (I \otimes U_n) \otimes (C \otimes U_c) \otimes (Z \otimes U_z) \otimes (H \otimes U_n) \otimes (\Phi \otimes U_{\phi}) \otimes (O \otimes U_o) \otimes (P \otimes U_p) \otimes (M \otimes U_m) \otimes (L \otimes U_l) \otimes U_{жц}$	Перестройка
5	Использование новой инновационной системы	$[(D \otimes U_d) \otimes (P \otimes U_n) \otimes (I \otimes U_n) \otimes (C \otimes U_c) \otimes (Z \otimes U_z) \otimes (H \otimes U_n) \otimes (\Phi \otimes U_{\phi}) \otimes (O \otimes U_o) \otimes (P \otimes U_p) \otimes (M \otimes U_m) \otimes (L \otimes U_l)] \otimes U_{жц}$	Инновационная перестройка

В таблице 1 индекс «б» означает принадлежность к старой (бывшей) системе, а индексы Д, П, И, С, С, Н, Ф, О, Р, М, Л – принадлежность к этапам жизненного цикла, на которых реализуются функции: интеллектуальной деятельности (маркетинг, научные исследования), проектирование, изготовление, сертификации, сбыта, налаживания с обучением, функционирования, обеспечения, ремонта, модернизации и утилизации

соответственно. Знаки  $OBi$ ,  $U_i$ ,  $i \in \{Д, П, И, С, С, Н, Ф, О, Р, М, Л\}$  указывают на функции обеспечения (инвентарем, энергией и т.д.) и управления.

Приведенные в таблице 1 данные позволяют установить связи мировых порогов знаний, показателей уровней новизны инноваций с необходимыми действиями на этапах инновационно-инвестиционного цикла (рисунок 2).

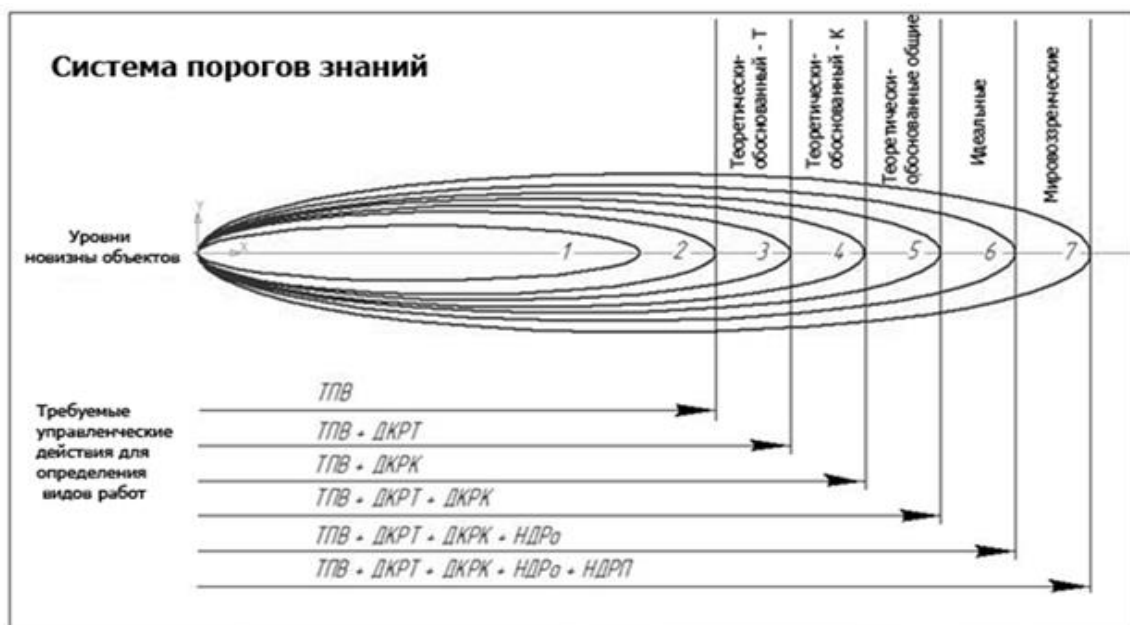


Рис. 2. Связи мировых порогов знаний, уровней новизны инноваций и необходимых действий на этапах жизненного цикла



**System of global thresholds of knowledge and its relations with attributes of artificial objects**

**E. Shandyba, R. Kogut, A. Pechenik, N. Ternyuk**

**Abstract.** The article considers the system of types of global thresholds of knowledge and the set of attributes of artificial objects. The hierarchical relations between the thresholds of knowledge and the relations of the same type between the attributes are found out. The article shows the structural correlation and additive character of the dependences between informational, economic and time characteristics of actions required for implementation of life cycle of innovations of the various levels of novelty and types of global thresholds of knowledge.

**Keywords:** *system, global thresholds of knowledge, set of attributes, artificial objects, life cycle, innovations*

Editor-in-chief: Dr. Xénia Vámos

The journal is published by the support of  
Society for Cultural and Scientific Progress in Central and Eastern Europe

Készült a Rózsadomb Contact Kft nyomdájában.  
1022 Budapest, Balogvár u. 1.  
[www.rcontact.hu](http://www.rcontact.hu)