

В.О.Балицька, к.ф.-м.н., с.н.с. (Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)

О.Й.Шпотьок, д.ф.-м.н., професор (Науково-виробниче підприємство „Карат”)

Л.І.Ярицька, к.ф.-м.н., доцент (Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)

ДО ПИТАННЯ ПРО ЧАСОВУ СТАБІЛЬНІСТЬ ОПТИКО-ДОЗИМЕТРИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ХАЛЬКОГЕНІДНИХ СТЕКОЛ

Проаналізовано особливості використання радіаційно-чутливих середовищ на основі халькогенідних стекол потрібної системи As-Ge-S стехіометричного As_2S_3 -GeS₂ та нестехіометричного As_2S_3 -Ge₂S₃ розрізів для реєстрації високоенергетичного γ -випромінювання. Наведено переваги та недоліки дозиметричного обладнання з використанням вказаних матеріалів. Показано, що пост-радіаційні процеси в опромінених стеклах описуються неекспоненціальною деградаційною кінетикою на основі релаксаційної функції Де Баста-Джіларда, яку може бути адекватно апроксимовано бімолекулярною часовою залежністю, що свідчить про визначальну роль процесів координаційного дефектоутворення у формуванні радіаційно-індукованих змін у досліджуваних стеклах.

Радіаційний моніторинг навколишнього середовища є одним з найважливіших заходів для попередження екстремальних ситуацій у життєдіяльності людини. Точність і надійність дозиметрів (індикаторів) іонізуючого випромінювання, що використовуються при його проведенні, відіграють важливу роль. В зв'язку з цим актуальною стає проблема забезпечення високого рівня стабільності функціональних матеріалів, що використовуються в дозиметричному обладнанні.

Одними з таких матеріалів є халькогенідні склоподібні напівпровідники – халькогенідні стекла (ХС) – напівпровідникові сполуки атомів халькогену сірки, селену та телуру з деякими елементами 4-ої та 5-ої групи періодичної системи, отримані у вигляді склоподібних зливків шляхом загартування розплаву [1,2]. Суттєвою перевагою цих неупорядкованих матеріалів у порівнянні з іншими відомими аналогами, які використовуються в радіаційній дозиметрії, є високий рівень вимірюваних доз, стійкість до дії агресивних зовнішніх чинників, а також низька температура відновлення початкового вимірювального стану [3,4]. Поряд з цим, істотним недоліком дозиметричних приладів на основі ХС є їх часова нестабільність, що проявляється в частковому неконтрольованому відновленні радіаційно-індукованих змін стекол після закінчення процесу опромінення. Такі ефекти умовно називають ще динамічними, на відміну від відомих статичних (тобто незмінних у часі після опромінення), за величиною яких і судять про поглинуту дозу радіації [5,6].

Метою даної роботи є вивчення процесу післярадіаційної нестабільності (часової деградації) радіаційно-індукованих оптичних ефектів в ХС потрібної системи As-Ge-S, що пропонуються в якості радіаційно-чутливих елементів твердотілого дозиметричного обладнання промислового призначення [7].

Як відомо, ХС проявляють радіаційно-індукований зсув краю фундаментального оптичного поглинання, величина якого χ суттєво залежить від поглинутої дози радіації Φ [4,6]:

$$\chi = S \cdot \lg \Phi + A. \quad (1)$$

Параметр S у співвідношенні (1) визначає радіаційну чутливість твердотілого дозиметра, тобто зміну величини χ при збільшенні чи зменшенні поглиненої дози радіації на порядок, тоді як константа A описує залежність спостережуваних радіаційно-індукованих ефектів від типу матеріалу (хімічного складу ХС і характеру його термічної передісторії).

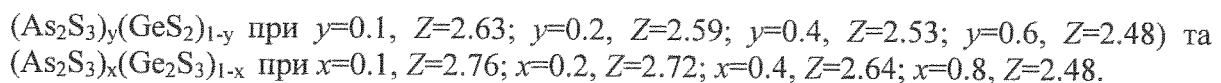
Величину χ у співвідношенні (1) можна замінити будь-яким параметром, який кількісно однозначно описує радіаційно-індукований зсув краю фундаментального оптичного поглинання ХС. Так, зокрема, можна використати зміну коефіцієнта оптичного пропускання плоскопаралельного зразка ХС на певній визначеній довжині хвилі з області краю прозорості (бажано в середині лінійної ділянки зміни прозорості зразка) [6]. У випадку склоподібного трисульфиду миш'яку товщиною 1-2 мм це легко здійснити для довжини хвилі гелій-неонового лазера 623 нм, тим самим суттєво спростивши процедуру подальшої обробки результатів дозиметричного контролю. Проте для інших ХС, зокрема потрібних стекл псевдобінарних розрізів типу $As_2S_3-Sb_2S_3$, $As_2S_3-As_2Se_3$, $As_2S_3-GeS_2$ та ін., край поглинання яких зміщений в довгохвильову область спектра, це не вдається зробити достатньо легко, не зважаючи на їх досить високу чутливість до поглинутих доз радіації [6]. В таких випадках доцільно використовувати спектральну залежність зміни коефіцієнта пропускання чи поглинання ХС в усьому діапазоні краю фундаментального оптичного поглинання [6]. Найчастіше, для визначення дози радіації беруть максимальне значення відносної зміни коефіцієнта поглинання в радіаційно-експонованих зразках ХС, розраховане як $\chi = (\Delta\alpha/\alpha_0)_{max}$, де $\Delta\alpha$ – різниця між коефіцієнтом поглинання до α_0 і після опромінення α [5,6]. Відповідні розрахунки коефіцієнта поглинання проводять з врахуванням відбивання зразка, яке покладають практично незмінним [6]. Як відомо, параметр χ проявляє певну часову нестабільність, монотонно згасаючи до деякого залишкового значення протягом 2-3 місяців після опромінення, що погіршує точність дозиметричного контролю поглинутих доз високоенергетичної радіації через неконтрольовані післярадіаційні релаксаційні процеси, які маскують справжню величину радіаційно-стабільних змін.

Строго кажучи, параметр χ у співвідношенні (1) містить дві компоненти – динамічну $\chi_{дин.}$, яка поступово спадає після опромінення, і статичну $\chi_{ст.}$, що залишається відносно незмінною протягом довгого проміжку часу після опромінення [8-10]:

$$\chi = \chi_{дин.} + \chi_{ст.} \quad (2)$$

Друга компонента $\chi_{ст.}$ в (2) суттєво залежить від величини поглинутої дози опромінення, в зв'язку з чим саме її кількісне значення безпосередньо використовується в твердотільних дозиметрах на основі ХС, тоді як величина $\chi_{дин.}$ є джерелом додаткової похибки у визначенні поглинутої дози радіації.

Для досліджень нами було відібрано зразки ХС потрібної системи As-Ge-S у стехіометричному та нестехіометричному співвідношенні (з метою кількісної характеристики хімічного складу зразків в межах вказаних співвідношень нами використано середнє координаційне число Z , розраховане як число найближчих атомів-сусідів на один атом формульної одиниці в за припущення повної ковалентної пов'язаності структурної матриці ХС):



Як відомо, структурні особливості таких ХС визначаються поєднанням двомірних As-базованих пірамідальних комплексів типу $AsS_{3/2}$ з $Z=2.4$ та тримірних тетраедричних комплексів типу $GeS_{4/2}$ з $Z=2.67$ [6]. У випадку псевдобінарного розрізу $As_2S_3-GeS_2$ очікується плавна монотонна зміна властивостей ХС у діапазоні $2.40 < Z < 2.67$ [11], тоді як у нестехіометричних ХС системи $As_2S_3-Ge_2S_3$ можливі певні аномалії поблизу $Z=2.67$, природа яких до цього часу залишається дискусійною [12, 13].

Всі зразки ХС було синтезовано традиційним, добре апробованим методом охолодження розплаву з вихідних компонентів чистотою не гіршою за 99,999 %. Після синтезу всі зразки

проходили експрес-тестування на предмет їх аморфності, про що свідчили відсутність гострих максимумів на рентгендіфрактограмах порошків, прозорість плоскопаралельних пластин ХС в ГЧ області та характерний раковистий злам, отриманий на всіх зливках після їх безпосереднього вилучення з ампул. З отриманих зливок виготовлялися плоскопаралельні радіаційно-чутливі елементи у формі дисків оптичної якості товщиною 1-2 мм та діаметром 10-15 мм. Опромінення ХС проводили γ -квантами в каналі джерела Co^{60} при поглинутих дозах Φ від 1 до 10 МГр та середній енергії 1.25 МеВ.

Спектральні залежності оптичного пропускання $\tau(\lambda)$ в області краю фундаментального оптичного поглинання реєстрували за допомогою двопробеневого спектрофотометра "Specord M-40" (200-900 нм). Вимірювання проводили до опромінення, відразу після закінчення γ -опромінення визначеною дозою радіації та в різні періоди часу після опромінення протягом 3-місячного зберігання опромінених зразків ХС. Величину коефіцієнта оптичного поглинання α визначали з відомого співвідношення для сильнопоглинальних середовищ, що враховує коефіцієнт відбивання r [14]:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{(1-r)^2}{\tau}, \quad (3)$$

де d – товщина зразка ХСН.

Після γ -опромінення спостерігався довгохвильовий зсув краю фундаментального оптичного поглинання для всіх досліджуваних зразків ХС, причому спектральні залежності величини χ мали форму дзвону з чітко вираженим максимумом $\chi = (\Delta\alpha/\alpha_0)_{max}$, достатньо пологим високо- та порівняно різким низькоенергетичним «крилами» [6].

Спостережуване радіаційно-індуковане потемніння проявляло часову нестабільність, що проявлялося в монотонному затуханні параметра χ протягом 2-3 місяців до деякого залишкового значення $\chi_{ст}$, як це показано на рис. 1 для γ -опромінених стекел $(\text{As}_2\text{S}_3)_{0.1}(\text{Ge}_2\text{S}_3)_{0.9}$ і $(\text{As}_2\text{S}_3)_{0.8}(\text{Ge}_2\text{S}_3)_{0.2}$.

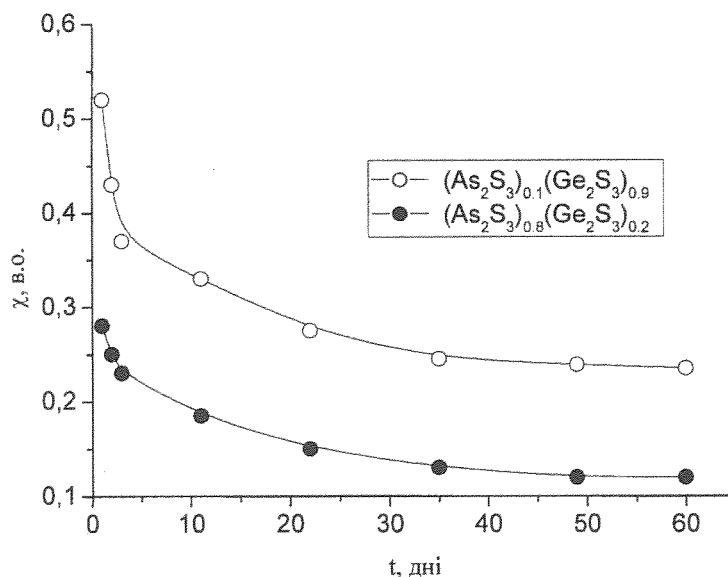


Рис. 1. Типові релаксаційні залежності параметра χ для γ -опромінених ХС $(\text{As}_2\text{S}_3)_{0.1}(\text{Ge}_2\text{S}_3)_{0.9}$ і $(\text{As}_2\text{S}_3)_{0.8}(\text{Ge}_2\text{S}_3)_{0.2}$.

Подібні часові залежності були отримані і для інших досліджуваних ХС [9,10]. Всі вони відзначалися досить інтенсивним зменшенням радіаційно-чутливого параметра χ в перші 10-15 діб після γ -опромінення з подальшою відносно більш довготривалою ділянкою спаду

протягом 20-30 діб. Після цього величина χ стабілізувалася на деякому рівні $\chi_{ст.}$, повністю її можна було усунути лише шляхом додаткового термовідпалу зразків ХС при температурах, близьких до T_g (вищих порогової температури стирання радіаційної інформації) [6].

Таким чином, на всьому етапі динамічних радіаційно-індукованих ефектів твердотільні дозиметричні системи на основі ХС неперервно втрачають свою чутливість S до поглинутої дози радіації в зв'язку з постійним затуханням величини контрольованого параметра χ . Значною мірою дана зміна визначається типом ХС, проявляючи лише достатньо слабку залежність від середнього координаційного числа Z для двомірних ($Z < 2.67$) та тримірних ($Z > 2.67$) ХС (див. рис. 2). Така поведінка свідчить про домінування структурно-хімічної природи в кінетиці радіаційно-індукованої метастабільності. Пов'язуючи спостережувані зміни з координаційними дефектами ХС, про що яскраво свідчать численні експерименти з застосуванням техніки ІЧ поглинання [15,16], можна стверджувати, що динамічна складова даних змін однозначно викликана процесами з нульовим або достатньо малим (в порівнянні із тепловою енергією) бар'єром переключення ковалентних хімічних зв'язків матриці. Іншими словами, динамічна складова радіаційно-індукованого потемніння в γ -опромінених ХС появляється за рахунок неконтрольованої анігіляції створених координаційних дефектів в умовах зберігання зразків при кімнатній температурі після припинення дії радіації. У випадку тримірних ХС з $Z > 2.67$ більш широка гама таких процесів визначає сильніше затухання радіаційної чутливості в порівнянні з двомірними ХС ($Z < 2.67$). Це означає, що створені радіацією координаційні дефекти, суттєво відрізняються в ХС, збагачених As і Ge.

Як відомо, в As-збагачених ХС домінуючими процесами радіаційно-індукованого координаційного дефектоутворення є процеси, пов'язані з переключенням гетерополярних зв'язків As-S в гомополярні зв'язки As-As і S-S [6]. Принципово інший тип структурних перетворень спостерігається в Ge-збагачених ХС, де переключення гетерополярних зв'язків Ge-S в гомополярні зв'язки Ge-Ge не дозволено через неможливість існування надкоординованих атомів Ge [17] і можливі тільки переключення гетерополярних зв'язків Ge-S в гомополярні зв'язки S-S. Таке переключення характеризується додатним енергетичним бар'єром. Воно є можливим лише завдяки високому значенню вільного об'єму в Ge-збагачених ХС [6,17]. Одночасно, Ge-збагачені ХС відзначаються енергетичною нестабільністю цих змін, даючи різке збільшення ΔS при $Z > 2.7$ (рис.2).

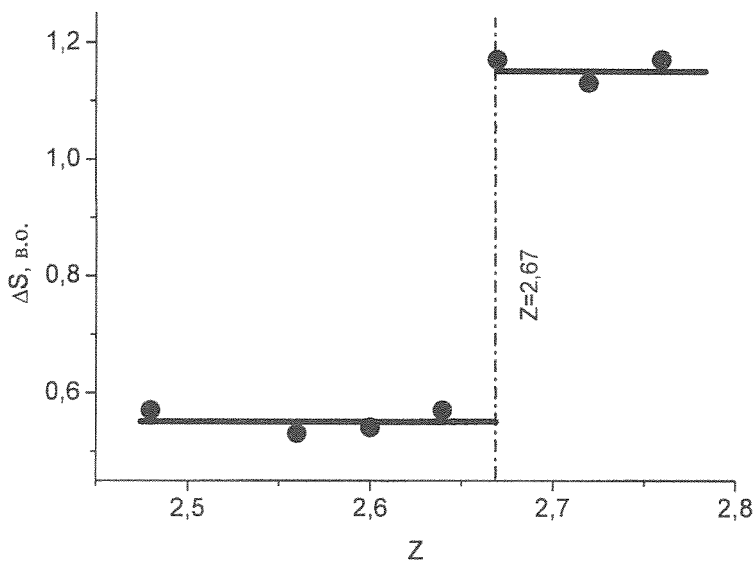


Рис. 2. Композиційна залежність втрати радіаційної чутливості через динамічну складову в ХС системи $As_2S_3-Ge_2S_3$.

Добре відомо, що подібні композиційні особливості спостерігаються і в поведінці вільного об'єму досліджуваних ХС [6]. Так що резонно пояснити спостережувану залежність $\Delta S(Z)$ на рис. 2 через високу стабільність радіаційно-індукованих координаційних дефектів (пар недо- і над-координованих атомів з надлишком негативного і позитивного електричного заряду, відповідно в ХС з більшим високим значенням вільного об'єму [6]. Чим вище значення вільного об'єму в матриці скла, тим більшою є концентрація координаційних дефектів в опромінену ХС, і, відповідно, вищим є значення чутливості S в будь-який момент часу вимірювання.

Таким чином, про величину поглинутої дози радіації можна адекватно судити лише по статичній складовій спостережуваних радіаційно-оптичних змін, яку можна достатньо надійно встановити лише після 2-3-місячного зберігання опромінених зразків ХС у нормальних умовах (умови навколишнього середовища). Якщо ж динамічну складову не вдається вилучити з розгляду, необхідно врахувати кінетику часової деградації радіаційної чутливості ХС.

Для дослідження кінетики часового затухання динамічної складової нами було використано 5 релаксаційних функцій (РФ), що відповідають різним механізмам деградації координаційних дефектів в ХС [8]. Найбільш оптимальною вибиралася РФ з міркувань найменшого значення *err* (відхилення «підгоночної» кривої, що відповідає тій чи іншій РФ, від експериментально побудованої кінетичної залежності) та найменшої кількості параметрів РФ. Виходячи з цього, було встановлено, що кінетика деградації параметра $(\Delta\alpha/\alpha_0)_{max}$ в γ -опромінених зразках ХС найбільш точно може бути описана так званою розтягнуто-експоненціальною РФ, яку іноді називають ще РФ Де Баста-Джіларда [18].

Слід відмітити, що механізми деградаційних процесів, що описуються розтягнуто-експоненціальною РФ, досить різноманітні, проте серед них можна виділити дві основних групи. До першої групи відносяться механізми, що використовують уявлення про дисперсійний транспорт в неупорядкованих структурах: дефекти, що відповідають за те чи інше відхилення системи від стану термодинамічної рівноваги, перш, ніж цілком застабілізуватися в процесі деградаційного тесту, беруть участь в багатократних процесах захоплення і звільнення [19]. Кількісні параметри актів захоплення і звільнення утворюють неперервний спектр у відповідності із структурною розпорядкованістю твердотільної системи. Основою другого механізму служить модель ієрархічно обмеженої динаміки релаксації: кожна окрема релаксаційна перебудова в розпорядкованій структурі стає можливою тільки після релаксації попередніх рівнів, які створюють для неї відповідні умови, наприклад, в формі звільненого вільного об'єму [20].

Розтягнуто-експоненціальна РФ може бути ефективно замінена бімолекулярною РФ, яка описує спостережувані процеси майже з такою ж точністю, але з меншою кількістю підгоночних параметрів:

$$\chi = \frac{\chi_0}{1 + \frac{t}{\tau}}, \quad (3)$$

Ця РФ є розв'язком наступного диференціального рівняння деградації:

$$\frac{d\chi}{dt} = -\lambda\chi^2, \quad (4)$$

де $\chi_0 = e^c$, c – стала інтегрування, $\tau = \frac{1}{\lambda}$, ($\lambda \neq 0$).

Бімолекулярна кінетика властива релаксаційним процесам, що викликані рекомбінацією специфічних дефектних центрів протилежного походження – вакансій і включень, електронів і дірок, над- і недокоординованих атомів, тощо [21].

Переважаання бімолекулярного механізму рекомбінації свідчить на користь того, що природа формування та релаксації радіаційно-індукованих ефектів в досліджуваних ХС

пов'язана з утворенням внаслідок високоенергетичного γ -опромінення дефектних пар порушеної координації (так званих D^+D^- центрів) та їх попарною анігіляцією при загальному збереженні електронейтральності зразка шляхом переключення відповідних хімічних зв'язків, як це було показано експериментально методом ІЧ Фур'є-спектрометрії [22].

Таким чином для коректного визначення поглинутої дози в будь-який момент часу після опромінення, слід брати до уваги бімолекулярний релаксаційний процес, властивий анігіляції координаційних дефектів різної природи. Чисельне значення чутливості ΔS після опромінення (S_0 – чутливість в щойно опромінених ХС) може бути пораховано виходячи з формули:

$$\Delta S = \frac{S_0}{1 + \frac{t}{\tau}}, \quad (5)$$

де константа τ описує сумарну тривалість релаксаційного процесу.

Розуміння природи радіаційно-індукованих структурних перетворень в склоподібній матриці ХС дозволяє підібрати оптимальні хімічні склади ХС в межах трикомпонентної системи As-Ge-S для використання в дозиметрії високоенергетичних γ -квантів.

Дана робота підтримана Фондом цивільного розвитку та досліджень США (проект УКЕ2-2816-LV-06).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Борисова З.У. Халькогенидны́е полупроводниковые стекла. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та. – 1983. – 344 с.
2. Айо Л.Г., Кокорина В.Ф. Метод лабораторного получения сульфо-селенидных оптических стекол. – *Оптико-механическая промышленность*. – 1961. – № 4. – С. 39-41.
3. Шпотюк О.И. Температурная стабильность индуцированных гамма-облучением эффектов в стеклообразном трисульфиде мышьяка. – *Ж. прикл. спектроскопии*. – 1987. – Т. 46. – С. 122-126.
4. Shpotyuk O.I., Balitska V.O., Vakiv M.M. and Shpotyuk L.I. Sensors of high-energetic radiation based on amorphous chalcogenides. – *Sensor and Actuators*. – 1998. – Vol. 68, No 1-3. – P. 356-358.
5. Shpotyuk O.I., Kovalskiy A.P., Skordeva E. et al. Effect of gamma-irradiation on the optical properties of $Ge_xAs_{40-x}S_{60}$ glasses. – *Physica B*. – 1999. – Vol. 271. – P. 242-247.
6. Shpotyuk O. Radiation-induced effects in chalcogenide vitreous semiconductors. *Semiconducting Chalcogenide Glass 1: Glass Formation, Structure, and Simulated Transformations in Chalcogenide Glasses*. – Ed. Fairman R. and Ushkov B. Elsevier Academic Press. – 2004. – P. 215-260.
7. Франк М., Штольц Б. Твердотельная дозиметрия ионизирующих излучений. – М.: Атомиздат, 1973. – 247 с.
8. Balitska V., Filipecki J., Shpotyuk O., Swiatek J., Vakiv M. Dynamic radiation-induced effects in chalcogenide vitreous compounds. – *J. Non-Cryst. Solids*. – 2001. – Vol. 287. – P. 216-221.
9. Shpotyuk O.I., Kavetsky T.S., Kovalskiy A.P., Pamukchieva V. Gamma-irradiation effect on the optical properties of $Ge_xSb_{40-x}S_{60}$ chalcogenide glasses. – *Proc. SPIE*. – 2000. – Vol. 4415 "Optical Organic and Inorganic Materials". – P. 278-283.
10. Shpotyuk O., Kavetsky T., Filipecki J., Kovalskiy A., Pamukchieva V. Radiation-induced optical effects in Sb_2S_3 - GeS_2 chalcogenide glasses. – *Prace naukowe Wyższej Szkoły Pedagogicznej w Częstochowie. Ser.: Chemia*. – 2001. – Z. 5. – S. 189-195.
11. Shpotyuk O.I., Golovchak R.Ya., Kavetsky T.S., Kovalskiy A.P., Vakiv M.M. Radiation-optical effects in glassy Ge-As(Sb)-S systems. – *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*. – 2000. – Vol. 166-167. – 517-519.

12. Tanaka Ke. *Structural phase transitions in chalcogenide glasses.* – *Phys. Rev. B.* – 1989. – Vol. 39, No 2. – P. 1270-1279.
13. Boolchand P., Georgiev D.G. and Micolaut M. *Nature of glass transition in chalcogenides.* – *J. Optoelectron. Adv. Mater.* – 2002. – Vol. 4, No 4. – P. 823-836.
14. Уханов В.И. *Оптические свойства полупроводников.* – Москва: Наука. – 1977. – 253 с.
15. Shpotyuk O.I., Kovalsky A.P., Vakiv M.M., Mrooz O.Ya. *Reversible radiation effects in vitreous As₂S₃. 1. Changes of physical properties.* – *Phys. Stat. Sol. A.* – 1994. – Vol. 144. – P. 277-281.
16. Shpotyuk O.I. and Matkovskii A.O. *Radiation-stimulated processes in arsenic trisulphide.* – *J. Non-Cryst. Solids.* – 1994. – Vol. 176. – P. 45-50.
17. Golovchak R., Shpotyuk O., 2005. *Radiation-induced bond switching in mixed Ge-As sulphide glasses.* – *Philosophical Magazine.* – 2006. – Vol. 85, No 25. – P. 2847-2860.
18. De Bast J., Gilard P. *Variation of the viscosity of glass and relaxation of stresses during stabilization.* – *Phys. Chem. Glasses.* – 1963. – Vol. 4, No 4. – P. 117-128.
19. Emelianova E.V., Hertogen P., Arkhipov V.I., Adriaenssens G.I. *A model of photoinduced anisotropy in chalcogenide glasses.* – *J. Non-Cryst. Solids.* – 2000. – Vol. 266-269. – P. 954-958.
20. Гусаров А.И., Дмитрюк А.В., Кононов А.Н., Машков А.А. *Долговременная кинетика активационных спектров пострадиационной релаксации в стеклах.* – *Ж. Эксп. Теор. Физ.* – 1990. – Т. 97. – С. 525-540.
21. Griscom D.L., Gingerich M.E., Friebele E.J. *Radiation-induced defects in glasses: origin of power-law dependence of concentration on dose.* – *Phys. Rev. Letters.* – 1993. – Vol. 71, No 7. – P. 1019-1021.
22. Shpotyuk O.I., Matkovskii A.O., Kovalsky A.P., Vakiv M.M. *Radiation-induced changes of amorphous As₂S₃ physical properties. Radiation Effects and Defects in Solids.* – 1995. – Vol. 133, No 1. – P. 1-4.

УДК 539.377

М.І.Бужанський (Управління будівельно-монтажних робіт Укргазспецбудмонтаж)

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ, ОБУМОВЛЕНОГО ЗМІНОЮ ТЕМПЕРАТУРИ

Запропонована методика визначення та дослідження деформацій і напружень в залізобетонних конструкціях циліндричної форми при зміні температури. Результати числових досліджень зображені графічно.

Актуальність теми. Переважна більшість конструкцій сучасної будівельної промисловості виготовляється із залізобетону і має складну конфігурацію. Технологічні процеси їх виготовлення та експлуатація часто здійснюються при значних температурних змінах. Теплофізичні і механічні параметри металу і бетону відрізняються за величиною і значною мірою впливають на їх міцність, надійність і ефективність виробництва. При будівництві масивних залізобетонних споруд (градирні, резервуари, промислові цехи, сховища та ін.) часто виникають тріщини ще до початку експлуатації [1,2]. Причиною утворення тріщин є температурні деформації. Ці деформації є неминучими в масивних бетонних конструкціях, які розігріваються в молодому віці бетону від екзотермії, а потім вистигають із плином часу. Температурні деформації властиві також спорудам, які