

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ВІРТУАЛЬНИХ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ НА БАЗІ Х-ПРОМЕНЕВОГО ДИФРАКТОМЕТРА ДРОН-3

Створено алгоритми та програмне забезпечення для проведення віртуальних лабораторних робіт на базі Х-променевого дифрактометра ДРОН-3. Розроблена програма "DRON3_Sim_2014" призначена: для двовимірної (2D) та тривимірної (3D) візуалізації блоків дифрактометра, а також для розрахунку інтенсивності Х-променевих кривих повного зовнішнього відбивання, визначення параметрів досліджуваних зразків шляхом наближення модельованих Х-променевих кривих до експериментальних, обробки і візуалізації отриманих даних. В процесі виконання роботи передбачається вибір матеріалу і розмірів досліджуваних зразків, довжин хвиль Х-променів, поворотів зразка і Х-хвильового детектора. Програмне забезпечення розроблено в середовищі *Borland Delphi 7* з використанням системи моделювання тривимірних об'єктів *GLScene*.

Ключові слова: Х-променевий дифрактометр, явище повного зовнішнього відбивання, гоніометр, детектор.

Созданы алгоритмы и программное обеспечение для проведения виртуальных лабораторных работ на базе рентгеновского дифрактометра ДРОН-3. Программа "DRON3_Sim_2014" предназначена: для двумерной (2D) и трехмерной (3D) визуализации блоков дифрактометра, а также для расчета интенсивности кривых полного внешнего отражения рентгеновских волн, определение параметров исследуемых образцов путем приближения моделируемых и экспериментальных кривых, обработки и визуализации полученных данных. В процессе выполнения работы предполагается выбор материала и размеров исследуемых образцов, длин рентгеновских волн, поворотов образца и рентгеновского детектора. Программное обеспечение разработано в среде *Borland Delphi 7* с использованием системы моделирования трехмерных объектов *GLScene*.

Ключевые слова: рентгеновский дифрактометр, явление полного внешнего отражения, гониметр, детектор.

Algorithms and software for virtual laboratory works on the basis of X-ray diffractometer DRON-3 are created. The program "DRON3_Sim_2014" is designed: for two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) imaging of the diffractometer units; for modelling of material choice and size of the samples, the wavelength of X-rays, turns the sample and the detector X-rays; for calculate the intensity of X-ray curves by method of X-Ray total external reflection, determine the parameters of the samples by fitting simulated X-ray curves to experimental, processing and visualization of the data. Software developed in Borland Delphi 7 environment using system of modelling three-dimensional objects *GLScene*.

Keywords: X-ray diffraction, a phenomenon full external reflection, goniometer, detector.

Вступ

Віртуальні лабораторні роботи (ВЛР) є ефективним доповненням до реальних лабораторних робіт, оскільки вони не потребують складного апаратного забезпечення і сприяють підвищенню мобільності студентів та викладачів [1-3]. Особливо актуально це при проведенні лабораторних робіт на базі Х-променевих дифрактометрів, оскільки

ки доступ до такого апаратного забезпечення студенти мають тільки в спеціалізованих лабораторіях. Виконання студентом ВЛР дозволяє краще підготувати його до виконання реальної лабораторної роботи, тому при роботі з Х-променевим обладнанням ВЛР, крім вищенаведених переваг, дозволяють також підвищити безпеку навчального процесу.

На даний час ВЛР широко використовуються при моделюванні різноманітних фізичних і технічних систем [1]. За допомогою ВЛР можна виконувати такі види досліджень: здійснювати імітаційне моделювання фізичних процесів згідно математичної моделі досліджуваного об'єкта; вносити необхідні корективи в результати досліджень та характеристики об'єкта. ВЛР інтерактивно моделює фізичні процеси в реальному технічному об'єкті та його істотні для вивчення властивості із застосуванням засобів комп'ютерної візуалізації. Програмне забезпечення ВЛР дозволяє візуалізувати навіть ті об'єкти і процеси, які в реальних приладах є невидимими людськими оком, наприклад, X-хвилі.

В учбовому процесі ВЛР реалізуються у вигляді віртуальних учбових лабораторій [1, 3]. Концепція віртуальної учбової лабораторії орієнтована на реалізацію вимог до комп'ютеризації підготовки студентів, відповідає ідеям відкритого і дистанційного навчання, дозволяє частково згладити гостроту існуючих проблем матеріально-технічного забезпечення учбового процесу. Доцільність і ефективність створення ВЛР обумовлена тенденцією зростання обсягу самостійної роботи студентів, необхідністю економії матеріальних витрат на організацію традиційного лабораторного практикуму.

Для створення ВЛР використовуються різні технології і середовища, наприклад технологія *Adobe Macromedia Flash*, середовища *LMS Moodle*, *Matlab* та ін. [1-2]. З метою підвищення реалістичності ВЛР часто використовується тривимірна візуалізація об'єктів дослідження. Проте серед розроблених ВЛР немає таких, які призначені для проведення лабораторних робіт на базі X-променевого дифрактометра ДРОН-3. Водночас у навчальному процесі і наукових дослідженнях українських ВНЗ дифрактометр ДРОН-3 використовується досить часто, тому виникла потреба у створенні спеціалізованого програмного забезпечення для проведення ВЛР на базі цього X-променевого апарату.

1. Математична модель дослідження поверхні методом повного зовнішнього відбивання X-хвиль

На поверхню плоского зразка під малим кутом ковзання падає вузький X-промінь (первинний пучок), дзеркально відбивається від поверхні і реєструється детектором [4-6]. У випадку шорсткої поверхні спостерігається розсіювання відбитих променів по кутам за рахунок нерівностей поверхні.

Явище ПЗВ X-хвиль на границі двох середовищ зумовлене різницею показників заломлення. Показник заломлення n , який залежить від довжини X-хвилі λ , на границі середовища 1 (вакууму або повітря) і середовища 2 (речовини) визначається як:

$$n = \cos \theta / \cos \theta_2, \quad (1)$$

де θ – кут ковзання між падаючим променем та дотичною до поверхні розділу середовищ в точці падіння, θ_2 – кут між заломленим променем і дотичною.

При $\theta_2=0$ з (1) отримуємо умову для граничного кута ПЗВ θ_c

$$\cos \theta_c = n. \quad (2)$$

Для X-хвиль показник заломлення визначено як

$$n = 1 - \delta - i\beta, \quad (3)$$

де δ – одиничний декримент показника заломлення, коефіцієнт β відповідає за поглинання.

Значення критичного кута ПЗВ

$$\theta_c = \sqrt{2\delta}. \quad (4)$$

Відношення інтенсивності відбитої хвилі $I_R(\theta)$ до інтенсивності падаючого (первинного) променя I_1 називається френелівським коефіцієнтом відбивання $I_f(\theta) = I_R(\theta)/I_1$ для кута ковзання θ . У випадку неполяризованого випромінювання та враховуючи малість величин δ , β та θ :

$$I_f = \frac{h - (\theta/\theta_c)\sqrt{2(h-1)}}{h + (\theta/\theta_c)\sqrt{2(h-1)}}, \quad (5)$$

$$\text{де } h = \left(\frac{\theta}{\theta_c}\right)^2 + \sqrt{\left[\left(\frac{\theta}{\theta_c}\right)^2 - 1\right]^2 + \left(\frac{\beta}{\delta}\right)^2}.$$

Залежність коефіцієнта відбивання $I_f(\theta)$

від кута ковзання θ та критичного кута θ_c лежить в основі методу інтегральних кривих (ІК) ПЗВ Х-хвиль [4]. Експериментальна схема методу ІК наведена на рис. 1.

У методі ІК ПЗВ на гладку поверхню плоского зразка K під кутом ковзання θ падає первинний пучок XR_1 Х-хвиль, а дзеркально

відбитий промінь та частина первинного пучка реєструється детектором D з широким входним вікном (рис. 1). Джерелом первинного пучка є Х-променева трубка, з якої він падає на монохроматор M і проходить через щілину S .

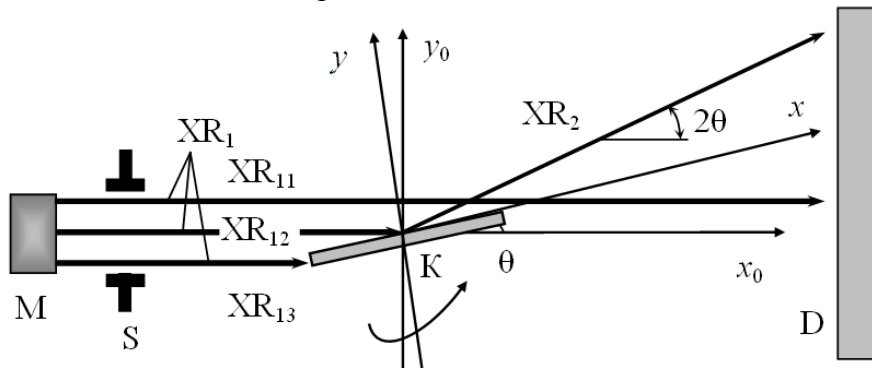


Рис. 1. Схема експерименту для методу інтегральних кривих ПЗВ Х-хвиль.

В початковому положенні при $\theta=0^\circ$ зразок K паралельний до первинного пучка і половинить його, тоді як в процесі дослідження зразок обертається навколо вертикальної осі на кут θ . Первинний пучок XR_1 має три складові: промінь XR_{11} проходить повз зразок у детектор, промінь XR_{12} падає на зразок, промінь XR_{13} поглинається бічною гранню зразка та деталями кріплення. Відбитий від зразка промінь XR_2 попадає в детектор D . Отже, детектор реєструє сумарну інтенсивність відбитого XR_2 та мимобіжного XR_{11} пучків.

Для опису повороту зразка вводиться прямокутна система координат xOy , яка пов'язана зі зразком (рис. 1). Вісь Ox направлена вздовж середньої лінії зразка. Вводиться також нерухома прямокутна система координат x_0Oy_0 , початок координат якої проходить через вертикальну вісь обертання зразка, вісь Ox_0 направлена вздовж напрямку первинного пучка.

У даній схемі експерименту пучок можна вважати паралельним і монохроматичним. Залежність інтенсивності первинного променя від координати y_0 описується функцією $I_1(y_0)$. Функція $I_1(y_0)$ апроксимується розподілом Гаусса з середньоквадратичними відхиленнями σ_{y_0} . Півширину первинного пучка B_{y_0} (~ 30 мкм) можна виразити через

середньоквадратичне відхилення σ_{y_0} , оскільки для розподілу Гаусса значення B_{y_0} пов'язане з σ_{y_0} так:

$$B_{y_0} = 2,3548 \sigma_{y_0}. \quad (6)$$

Інтенсивності пучків, що падають на зразок довжиною L_K та проходять повз зразок у детектор (рис. 2), розраховуються за інтенсивністю первинного пучка I_1 . Інтенсивність $I_{KP}(\theta)$ пучка XR_{12} (рис. 1) та інтенсивність $I_P(\theta)$ пучка XR_{11} обчислюються за формулами:

$$I_{KP}(\theta) = \int_{-y_{01}}^{y_{01}} I_1(y_0) dy_0, \quad (7)$$

$$I_P(\theta) = \int_{y_{01}}^{y_{02}} I_1(y_0) dy_0, \quad (8)$$

де y_{01} , $(-y_{01})$ – проекції кінців поверхні зразка на вісь Oy_0 (рис. 2), $y_{02} = 5\sigma_{y_0}$.

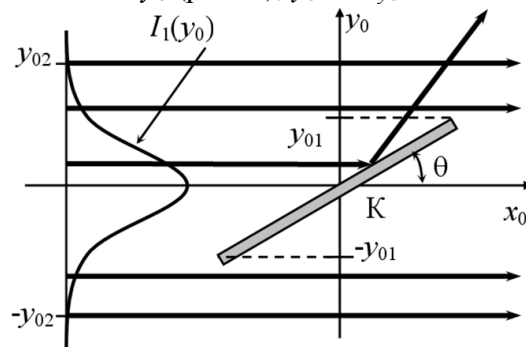


Рис. 2. Взаємодія первинного пучка зі зразком в методі інтегральних кривих ПЗВ Х-хвиль.

В ідеальному випадку вісь Ox_0 проходить через центр пучка X-променів (рис. 2), але у реальних експериментах центр пучка може бути зсунутий на величину S_{ly0} вздовж осі Oy_0 . Нахили профілю $\gamma(x)$ поверхні зразка описуються функцією розподілу нахилів $F_r(\gamma)$, яка фізично означає ймовірність нахилу мікроділянок поверхні під кутом γ ($\gamma_{\min} \leq \gamma \leq \gamma_{\max}$) відносно осі Ox .

Для реальних поверхонь висоти профілю $y(x)$ і кути нахилу $\gamma(x)$ розподілені за законом, близьким до нормального. Відповідно у даній моделі функція розподілу висот профілю $y(x)$ описується середнім квадратичним відхиленням R_q , а функція розподілу нахилів $F_r(\gamma)$ – середньоквадратичним відхиленням σ_γ . Якщо просторові параметри профілю поверхні зразка описано кореляційною довжиною L_a , то середнє квадратичне відхилення σ_γ для розподілу нахилів дорівнює

$$\sigma_\gamma = \frac{\sqrt{2}R_q}{L_a}. \quad (9)$$

Інтенсивність $I_K(\theta)$ відбитих X-хвиль від зразка обчислюється за інтенсивністю первинного променя з просторовим розподілом $I_1(y_0)$. Френелівський коефіцієнт $I_f(\theta)$ відбивання X-хвиль визначається зі співвідношення (5), а інтенсивність $I_K(\theta)$ дзеркально відбитих променів від шорсткої поверхні з

функцією нахилів $F_r(\gamma)$ дорівнює

$$I_K(\theta) = I_{KP}(\theta) \cdot \int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} F_r(\gamma) \cdot I_f(\theta + \gamma) d\gamma. \quad (10)$$

Отже, сумарна інтенсивність хвиль, що попадають у детектор, дорівнює

$$I_D(\theta) = I_K(\theta) + I_P(\theta). \quad (11)$$

З розподілу інтенсивності кривої $I_D(\theta)$ визначається кут θ_{CE} – експериментальне значення критичного кута ПЗВ X-хвиль. За θ_{CE} обчислюється реальна густина поверхневого шару речовини:

$$\rho_E = \rho \left(\frac{\theta_{CE}}{\theta_C} \right)^2, \quad (12)$$

де ρ – об'ємна густина, θ_C – теоретичне значення критичного кута ПЗВ X-хвиль.

2. Структура та функції програми "DRON3_Sim_2014"

Програма "DRON3_Sim_2014" розроблена в середовищі *Borland Delphi 7* [7] і призначена для проведення віртуальних лабораторних робіт на базі X-променевого дифрактометра ДРОН-3. З метою сумісності з існуючими програмами для автоматизації фізичного експерименту інтерфейс програми "DRON3_Sim_2014" (рис. 3) розроблено подібним до інтерфейсу керуючої програми для дифрактометра ДРОН-3 [5].

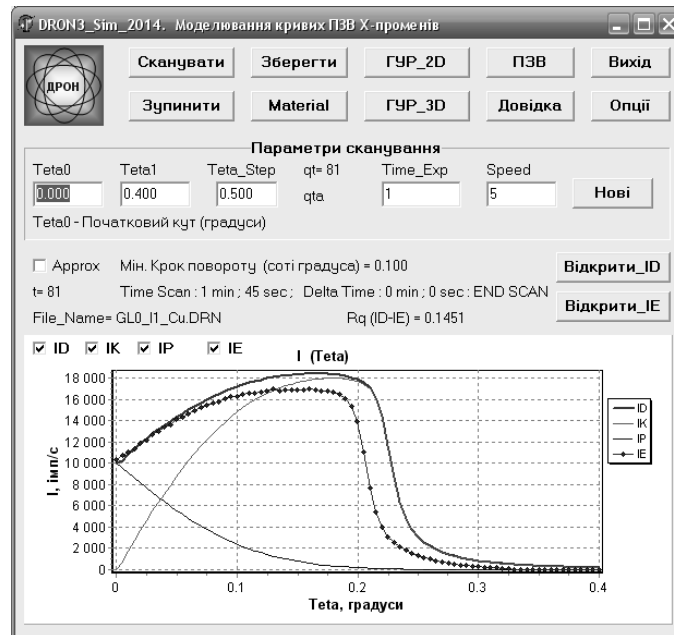


Рис. 3. Головна форма програми "DRON3_Sim_2014".

Основні функції програми наступні. Командою "Сканувати" виконується сканування кутового діапазону між початковим кутом $Teta_0$ і кінцевим кутом $Teta_1$ з кроком $Teta_Step$. Під час сканування, залежно від вибраного режиму, повертається або досліджуваний зразок, або детектор, або зразок і детектор одночасно. Кут повороту зразка позначається $Teta$, а детектора – $Teta_2$. У процесі сканування зразок і детектор зупиняються в кожній з q_t точок на час експозиції $Time_Exp$, під час якого зчитується інтенсивність Х-хвиль (кількість імпульсів за секунду) для певного кута. Швидкість повороту залежить від параметра $Speed$. У результаті сканування отримується модельована Х-хвильова крива $I_D(Teta)$, яка відображається у вигляді графіка і може бути збережена у файл. Сумарна інтенсивність кривої $I_D(Teta)$, яка обчислюється згідно математичної моделі (5-11), є сумою інтенсивності променів, що відбиваються від зразка через повне зовнішнє відбивання Х-хвиль $I_K(Teta)$, та хвиль, що проходять повз зразок у детектор $I_P(Teta)$. Під час сканування показується поточний час сканування $Time_Scan$ та час до завершення $Delta_Time$. Отримана Х-хвильова крива може бути апроксимована з кількістю точок q_{ta} . Збережена у файлі експериментальна крива $I_E(Teta)$ зчитується командою "Відкрити_ІЕ" і порівнюється з модельованою кривою $I_D(Teta)$.

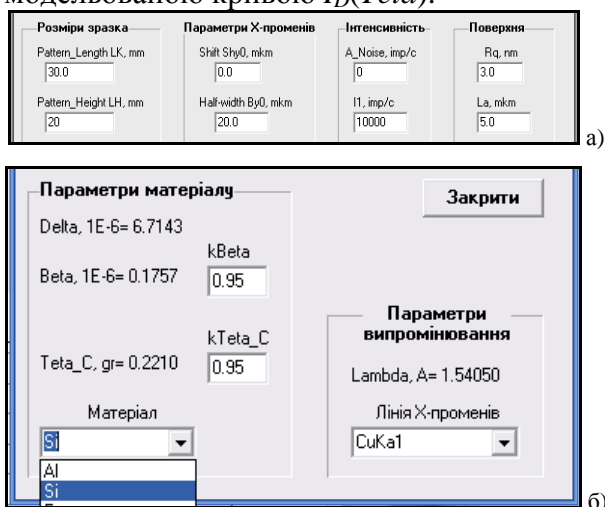


Рис. 4. Вибір параметрів зразка і випромінювання: фрагмент форми "Параметри ПЗВ" (а), форми "Матеріал" (б).

На формі "Параметри ПЗВ" (рис. 4а) визначаються розміри зразка (довжина L_K , висота L_H), параметри рельєфу його поверхні (середнє квадратичне відхилення R_q , кореляційна довжина L_a), параметри пучка Х-променів (зсув пучка S_{hy0} вздовж осі Oy_0 , півширина первинного пучка B_{y0} , інтенсивність шуму A_Noise , інтенсивність первинного пучка I_1).

На формі "Матеріал" (рис. 4б) вибираються параметри матеріалу зразка та випромінювання, де коефіцієнти $kBeta$ та k_Teta_C враховують зміну параметрів матеріалу β і θ_C порівняно з теоретичними. Параметри матеріалу досліджуваних зразків та використаних Х-хвиль зберігаються у текстових файлах і можуть доповнюватися користувачами програми.

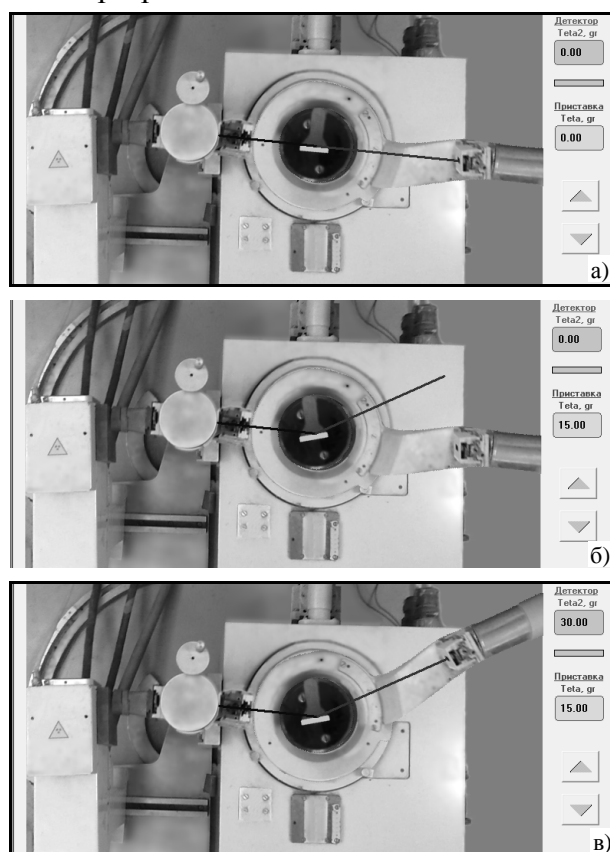


Рис. 5. Фрагмент форми "Гоніометр_2D": початкові кути повороту (а), поворот тільки зразка на кут $Teta$ (б), поворот зразка на кут $Teta$ і детектора на кут $Teta_2$ (в).

Двовимірний вид дифрактометра (рис.5а), який розроблений на основі фотографічних зображень апарату, відкривається командою

"ГУР_2D" на формі "Гоніометр_2D". На формі також можна ввімкнути візуалізацію падаючих і відбитих X-хвиль.

Згідно з алгоритмом (рис. 6) інтенсивність X-хвильової кривої розраховується для всіх дискретних значень кутів $Teta$, в результаті чого отримуємо модельову X-хвильову криву $I_D(Teta)$; при цьому кожному дискретному значенню кута $Teta$ відповідає точка кривої t .



Рис. 6. Схема алгоритму розрахунку інтенсивності $I_D(Teta)$ X-хвильової кривої.

Отже, користувач програми може зчитувати X-хвильову криву з файла, обробляти криву, наприклад, через контекстне меню графіка знаходити півширину кривої, встановлювати параметри матеріалу, параметри досліджуваного зразка та X-хвиль, режими і параметри сканування. Після встановлення всіх параметрів відбувається розрахунок інтенсивності X-хвильової кривої (кутове сканування). Під час сканування виконується 2D і 3D візуалізація експерименту.

3. Тривимірна візуалізація блоків дифрактометра ДРОН-3

Тривимірна модель дифрактометра створена у середовища *GLScene* [8] поєднанням таких геометричних фігур: прямокутні паралелепіпеди (*GLCube*), циліндри і конуси (*GLCylinder*), сфери (*GLSphere*), піраміди (*GLFrustum*) тощо. Кожний елемент моделі описується координатами його центру в прямокутній декартовій системі координат $\{xyz\}$ та в системі координат $\{x_G y_G z_G\}$ середовища *GLScene* (рис. 7), розмірами, орієнтацією та матеріалом поверхні. Повороти детектора і зразка відбуваються відносно нерухомої системи координат $\{xyz\}$. Як джерело випромінювання використовується компонент *GLLightSource1*. Координати камери *GLCamera1*, з якої користувач бачить тривимірне зображення, змінюються маніпулятором "миша" за допомогою компонента-навігатора *GLSimpleNavigation1* системи *GLScene*.

Модель дифрактометра в *GLScene* створена на основі реальних фотографій апарату [9, 10] із збереженням всіх елементів, потрібних при проведенні ВЛР (рис. 8, рис. 9).

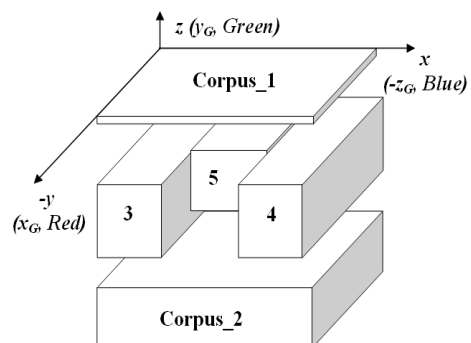


Рис. 7. Основні елементи моделі корпусу гоніометра ГУР-8 в системі *GLScene*.

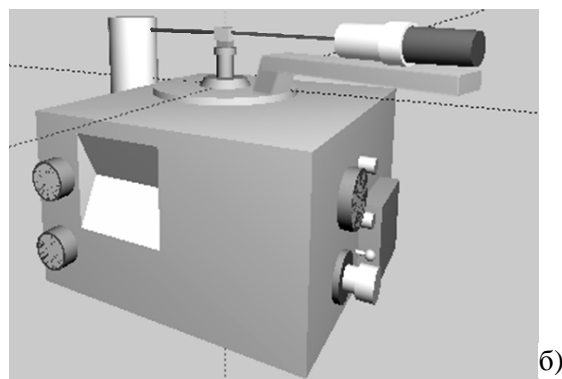
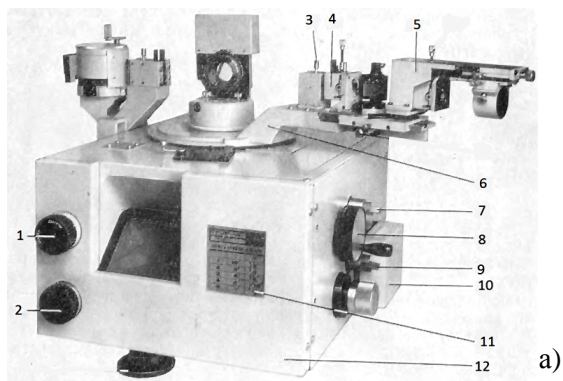


Рис. 8. Гоніометр ГУР-8. Вигляд зі сторони передньої панелі: фотографія (а), модель в *GLScene* (б); 1 – маховик перемикача шкал, 2 – маховик визначення кута повороту, 3 – отвір Соллера, 4 – вихідна щілина, 5 – монохроматор, 6 – кронштейн детектора, 7 – рукоятка детектора, 8 – маховик, 9 – рукоятка зразка, 10 – електродвигун, 11 – таблиця швидкостей, 12 – передня панель.

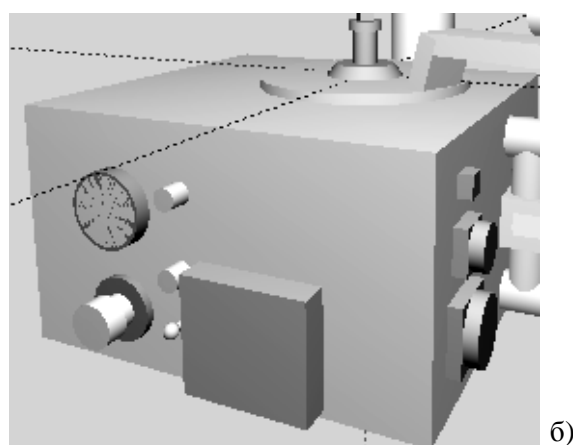
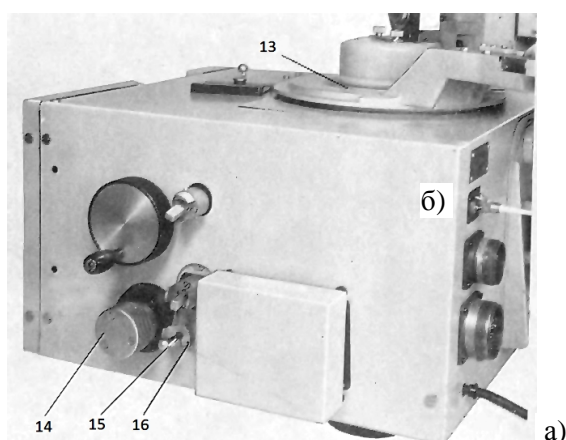


Рис. 9. Гоніометр ГУР-8. Вигляд зі сторони електродвигуна: фотографія (а), модель в *GLScene* (б); 13 – стіл зразка, 14 – барабан перемикача швидкості, 15 – рукоятка перемикача швидкості, 16 – основа рукоятки 15.

4. Моделювання Х-хвильових кривих

Розподіл інтенсивності Х-хвильової кривої, отриманої методом повного зовнішнього відбивання згідно математичної моделі (1-11), залежить від багатьох параметрів досліджуваного зразка і випромінювання, наприклад від коефіцієнта поглинання матеріалу $k\beta$, критичного кута ПЗВ θ_{SE} , довжини зразка L_K , зсуву пучка S_{hy0} , півширини первинного пучка B_{y0} , середнього квадратичного відхилення нерівностей поверхні R_q . Моделюючи Х-хвильові криві за різних значень параметрів досліджуваного зразка і випромінювання, можна встановити точний вплив кожного фактора на форму кривої (рис. 10).

Після вивчення впливу вищенаведених параметрів на форму Х-хвильової кривої проводиться наближення модельованої Х-хвильової кривої $I_D(\theta)$ до експериментальної

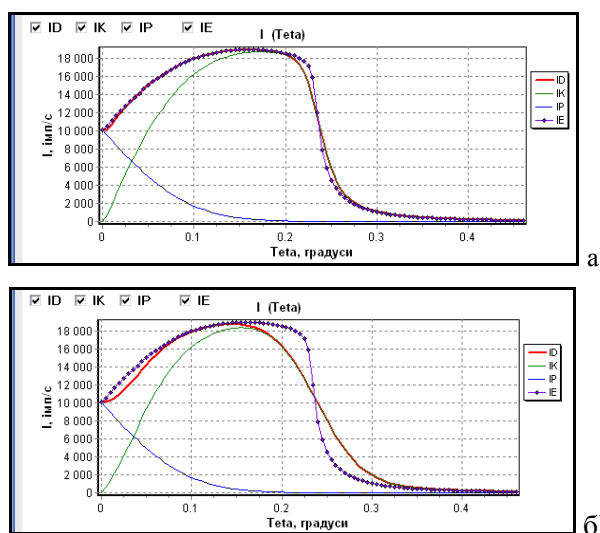


Рис. 10. Модельована $I_D(\theta)$ і початкова $I_E(\theta)$ Х-хвильові криві, де початкова крива розрахована при середньому квадратичному відхиленні нерівностей поверхні $R_q=0$ нм: $I_D(\theta)$ при $R_q=1,0$ нм (а), $I_D(\theta)$ при $R_q=3,0$ нм (б).

$I_E(\theta)$ (рис. 11) шляхом мінімізації середньої квадратичної різниці кривих $R_q(I_D-I_E)$ (рис. 3). У результаті такого наближення визначаються параметри досліджуваного зразка, наприклад середня квадратична висота нерівностей R_q і коефіцієнт $kTeta_C$ зменшення критичного кута ПЗВ порівняно з теоретичним θ_C . Коефіцієнт $kTeta_C$ використовується для обчислення експериментального значення критичного кута ПЗВ X-хвиль для матеріалу досліджуваного зразка: $\theta_{CE}=\theta_C \cdot kTeta_C$. За кутом θ_{CE} і формулою (12) обчислюється реальна густина поверхневого шару речовини ρ_E .

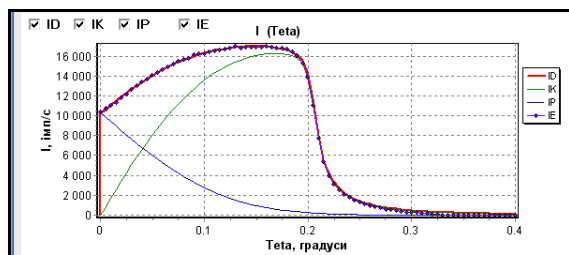


Рис. 11. Наближення модельованої X-хвильової кривої $I_D(\theta)$ до експериментальної $I_E(\theta)$; експериментальна крива отримана для зразка кварцового скла (SiO_2) і $CuK_{\alpha 1}$ -випромінювання; модельована крива розрахована для параметрів: $kBeta=0,87$, $L_K=20$ мм, $S_{hy0}=2$ мкм, $B_{y0}=35$ мкм, $R_q=0,25$ нм, $kTeta_C=0,87$.

Висновки

1. Розроблено математичну модель і алгоритм розрахунку інтенсивності X-хвильових кривих методом повного зовнішнього відбивання X-хвиль.
2. Створено оригінальну програму "DRON3_Sim_2014" для проведення віртуальних лабораторних робіт на базі X-променевого дифрактометра ДРОН-3. Програма створена в середовищі *Borland Delphi 7* з використанням системи *GLScene* для моделювання тривимірних об'єктів.
4. Використано одночасно двовимірну (2D) та тривимірну (3D) візуалізацію блоків X-променевого дифрактометра, що спрощує розуміння процесів, які відбуваються при виконанні віртуальної лабораторної роботи.
5. Реалізовано як незалежні, так і зв'язані повороти досліджуваного зразка і детектора X-хвиль у заданих кутових діапазонах.

6. Програма "DRON3_Sim_2014" дозволяє моделювати вплив на форму X-хвильової кривої основних експериментальних факторів: коефіцієнта поглинання матеріалу $kBeta$, критичного кута ПЗВ θ_{CE} , довжини зразка L_K , зсуву пучка S_{hy0} , півширини первинного пучка B_{y0} , середнього квадратичного відхилення нерівностей поверхні R_q .

7. За допомогою наближення модельованої X-хвильової кривої до експериментальної визначається величина шорсткості та густина поверхневого шару для досліджуваного зразка.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Родькін Д.Й., Чорний О.П., Євстифєєв В.О., Перекрест А.Л., Величко Т.В. Віртуальні лабораторні комплекси для навчального процесу і наукових досліджень. Підсумки і досвід розробки // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2008. – 3 (50). – С. 28-42.
2. Мазур М.П., Петровський С.С., Яновський М.Л. Особливості розробки віртуальних практичних інтерактивних засобів навчальних дисциплін для дистанційного навчання // Інформаційні технології в освіті. – 2010. – №7. – С. 40-46.
3. Євстифєєв В.А., Черный А.П., Величко Т.В. Віртуальний комплекс для учебного процесса и научных исследований // Вісник національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2005. – № 45. – С. 25-28.
4. Фодчук І.М., Баловсяк С.В. Діагностика поверхні твердого тіла. Загальний стан проблеми та X-променеві методи: Навчальний посібник. – Чернівці: Рута, 2007. – 288 с.
5. Баловсяк С.В., Фодчук І.М. Програмне забезпечення для автоматизованого керування X-променевими дифрактометрами // Науковий вісник ЧНУ. Комп'ютерні системи та компоненти. – 2011. – 2 (2). – С.57-63.
6. Баловсяк С.В., Фодчук І.М. Определение параметров рельефа поверхности твердого тела в случае полного внешнего отражения рентгеновских лучей, // Металлофизика и новейшие технологии. – 2003. – 25 (7). – С. 885-897.
7. Архангельский А.Я. Программирование в Delphi 7. – М.: БИНОМ, 2004. – 1152 с.
8. *GLScene*. OpenGL Solution for Delphi. [Електронний ресурс]. –<http://glscene.sourceforge.net/wikka/HomePage>.
9. Дифрактометр рентгеновский ДРОН-3М. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Ленинград : ЛОМО, 1985. – 70 с.
10. Гониометр ГУР-8. Техническое описание и эксплуатация. – Ленинград: ЛОМО, 1985. – 28 с.