

Численное и аналитическое решения гиперсингулярного уравнения в задаче о периодической системе трещин

Б. Я. Кантор, В. В. Науменко, О. В. Науменко, Е. А. Стрельникова

*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Украина
Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Украина*

The paper is concerned with hypersingular integrals which arise when boundary integral equations are used to solve some problems in fracture mechanics. The hypersingular integral equation generated by the second boundary value problem for 2D Laplace equation is represented in the form permitting to obtain analytical solution of the problem concern with periodic crack system in the infinite elastic body. The numerical method for its solution is also proposed. The calculated examples reveal a high level of accuracy and numerical efficiency of the developed approach.

В реальных материалах всегда имеется большое число различного рода микродефектов, развитие которых под действием приложенной нагрузки приводит к появлению трещин и к их росту, то есть к локальному или полному разрушению тела. Необходимость решения практических вопросов о прочности элементов конструкций и сооружений с трещинами вызвала большой интерес исследователей к изучению процесса деформирования и разрушения реальных твердых тел. К настоящему времени в рамках линейной теории упругости решено довольно много различных задач о напряженно-деформированном состоянии тел с трещинами. Впервые задача теории упругости для растягиваемой на бесконечности плоскости, ослабленной периодической системой коллинеарных трещин, была рассмотрена в [1]. Сингулярные интегральные уравнения периодической задачи теории упругости для плоскости с коллинеарными трещинами построены в [2-4]

В данной работе задача о концентрации напряжений в упругой изотропной плоскости с системой разрезов сведена к гиперсингулярному интегральному уравнению. В этом случае коэффициенты интенсивности напряжений выражаются через искомую плотность, а не через ее производную [2-4], что приводит к существенному повышению точности результатов. Вначале рассмотрено гиперсингулярное интегральное уравнение на криволинейном контуре; далее показано, что к уравнению такого вида сводится задача о периодической системе трещин в упругой плоскости.

Пусть контур L представляет собой дугу окружности радиуса R ; уравнение которой имеет вид $x_1 = R \cos \varphi$; $x_2 = R \sin \varphi$; $\alpha \leq \varphi \leq \beta$. Рассмотрим интегральное уравнение на этом контуре

$$\frac{1}{2\pi} \int_L \Gamma(\xi) \frac{\partial^2}{\partial n_x \partial n_\xi} \ln \frac{1}{|x - \xi|} dL = f(x), \quad x \in L. \quad (1)$$

Здесь

$$\begin{aligned}x &= (R \cos \varphi_0, R \sin \varphi_0); \quad \xi = (R \cos \varphi, R \sin \varphi); \\n_x &= (\cos \varphi_0, \sin \varphi_0); \quad n_\xi = (\cos \varphi, \sin \varphi).\end{aligned}$$

Подставим эти выражения в равенство

$$\frac{\partial^2}{\partial n_x \partial n_\xi} \ln \frac{1}{r} = \frac{2(\operatorname{grad} r, n_x)(\operatorname{grad} r, n_\xi) - (n_x, n_\xi)}{r^2}.$$

После преобразований уравнение (1) примет вид

$$(\mathbf{A} \Gamma)(\varphi_0) = \frac{1}{4\pi R} \int_{\alpha}^{\beta} \Gamma(\varphi) \frac{d\varphi}{\sin^2 \frac{\varphi - \varphi_0}{2}} = f(\varphi_0). \quad (2)$$

При $\alpha=0$, $\beta = 2\pi$, $R=1$ уравнение (2) совпадает с рассмотренным в монографии Ю.В. Ганделя [5] гиперсингулярным уравнением в пространстве тригонометрических полиномов. В [5] показано, что

$$\begin{aligned}\mathbf{A} : \cos k\varphi &\mapsto -k \cos k\varphi_0; \\ \mathbf{A} : \sin k\varphi &\mapsto -k \sin k\varphi_0; \quad k = 0, 1, 2, \dots\end{aligned} \quad (3)$$

Воспользуемся соотношениями (3) для построения аналитических решений уравнения (2) и тестирования алгоритма численного решения. При численной реализации предполагалось, что контур интегрирования разомкнут (для этого принималось, $\alpha=0$, $\beta = 2\pi - 0.00001$), а искомая плотность $\Gamma(\varphi)$ обращается в нуль на границах интервала интегрирования. Применялась кусочно-постоянная и кубическая аппроксимации плотности внутри элемента.

На рис. 1а) показана правая часть уравнения (2); она вычислялась по формуле $f(\varphi_0) = 8 \cos(8\varphi_0) + 9 \sin(9\varphi_0)$; аналитическое решение для такой правой части согласно [3] имеет вид $\Gamma(\varphi) = -\cos(8\varphi) - \sin(9\varphi) + 1$. Кривые 1 и 2 на рис. 1б) представляют аналитическое и численное решения рассматриваемого уравнения. Численное решение получено с использованием 40 граничных элементов с кубической аппроксимацией плотности; при аппроксимации контура использованы формулы, приведенные в [6,7].

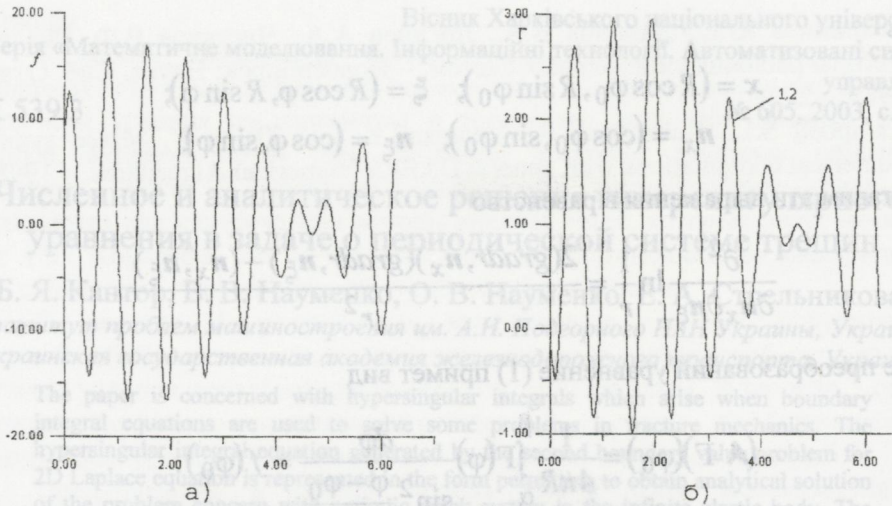


Рис.1. Плотность и правая часть уравнения (2)

При использовании кубических граничных элементов аналитическое и численное решение совпали с точностью $\epsilon=10^{-4}$. При использовании граничных элементов с постоянной аппроксимацией плотности точность $\epsilon=10^{-3}$ была достигнута лишь при применении 160 элементов.

К уравнению вида (2) сводится задача об определении напряжений в пластине, ослабленной периодической системой коллинеарных трещин, берега которых нагружены произвольной несомоуравновешенной растягивающей нагрузкой (рис.2).

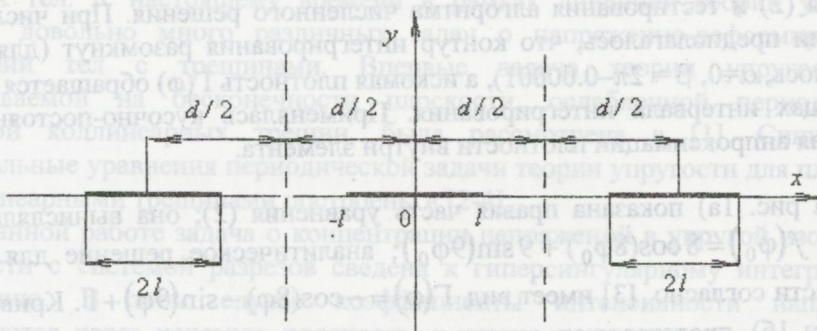


Рис.2. Периодическая система трещин.

В этом случае гиперсингулярное интегральное уравнение, описывающее поведение системы трещин, имеет вид

$$\int_{-l}^l \Gamma(x) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{1}{(x-x_0-kd)^2} dx = p(x_0); \quad (3)$$

Здесь

$$\frac{1}{2\pi} \int_L \Gamma(\xi) \frac{\partial^2}{\partial n_\xi \partial n_x} \ln \frac{1}{|x-\xi|} dl = f(x) \quad x \in L.$$

$$p(x_0) = \frac{1}{2}(\sigma_y^+ + \sigma_y^-) / M; \quad M = -\frac{\mu(\lambda + \mu)}{\pi(\lambda + 2\mu)}.$$

Преобразуем ядро полученного гиперсингулярного уравнения [8]

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{1}{(x - x_0 - kd)^2} = \frac{\pi^2}{d^2 \sin^2 \pi((x - x_0)/d)}.$$

Тогда уравнение (3) примет вид

$$\frac{1}{4\pi} \int_{-\alpha}^{\alpha} \Gamma(\varphi) \frac{d\varphi}{\sin^2 \frac{\varphi - \varphi_0}{2}} = p_1(\varphi_0), \quad (4)$$

где

$$\alpha = \frac{2\pi l}{d}; \quad p_1(\varphi_0) = 2dp(x_0); \quad \frac{l}{d} < \frac{1}{2}.$$

Аналитическое решение уравнения (4) получим следующим образом. Приведем (4) к виду [5]

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{\alpha} \Gamma'(\varphi) \operatorname{ctg} \left(\frac{\varphi - \varphi_0}{2} \right) d\varphi = p_1(\varphi_0). \quad (5)$$

Полученное уравнение необходимо решать при дополнительном условии

$$\int_{-\alpha}^{\alpha} \Gamma'(\varphi) d\varphi = 0. \quad (6)$$

Воспользовавшись равенством

$$\operatorname{ctg} \left(\frac{\varphi - \varphi_0}{2} \right) = \operatorname{tg} \frac{\varphi_0}{2} + \frac{1}{\cos^2(\varphi_0/2) [\operatorname{tg}(\varphi/2) - \operatorname{tg}(\varphi_0/2)]}$$

и сделав замену переменных

$$\eta = \operatorname{tg}(\varphi/2); \quad y = \operatorname{tg}(\varphi_0/2); \quad a = \operatorname{tg} \frac{\pi l}{d}; \quad p_2(y) = p_1(\varphi_0),$$

получим согласно [3], что

$$\Gamma'(y) = -\frac{1}{\sqrt{a^2 - y^2}} \int_{-a}^a \frac{\sqrt{a^2 - \eta^2} p_2(\eta)}{(1 + \eta^2)(\eta - y)} d\eta. \quad (7)$$

При $p_2(y) = p = \text{const}$ интеграл в (7) вычислим аналитически. Будем иметь

$$\Gamma'(y) = -2\pi r a \sqrt{1+a^2} \frac{y}{(1+y^2)\sqrt{a^2-y^2}}.$$

Интегрируя полученное равенство с учетом (6) и учитывая, что $y = \operatorname{tg}(\varphi/2)$, определяем

$$\Gamma(\varphi) = p \ln \left| \frac{\sqrt{1+\operatorname{tg}^2(\pi l/d)} - \sqrt{\operatorname{tg}^2(\pi l/d) - \operatorname{tg}^2(\varphi/2)}}{\sqrt{1+\operatorname{tg}^2(\pi l/d)} + \sqrt{\operatorname{tg}^2(\pi l/d) - \operatorname{tg}^2(\varphi/2)}} \right|. \quad (8)$$

Таким образом, получено аналитическое решение уравнения (2) в классе функций, отличных от тригонометрических полиномов.

На рис. 3 показаны аналитическое и численное решения уравнения (4) при $p_2(y) = 1$; $d = 4$; $l = 1$. Цифрой 1 на рис.3 отмечено аналитическое решение, цифрой 2 – численное.

Аналитическое решение построено по формуле (8), численное получено с использованием метода граничных элементов (МГЭ). Применены граничные элементы с постоянной аппроксимацией плотности внутри элемента. Гиперсингулярные интегралы с такой плотностью вычислены аналитически по формулам [6]. Этот вариант МГЭ по сути является методом дискретных особенностей [10]. При использовании 80 элементов достигнута точность $\varepsilon = 10^{-3}$. Отметим, что при $d=2l$ и $p_2(y) = \text{const}$ как численно, так и аналитически не удается получить решение уравнений (2),(5), так как в этом вырожденном случае расстояние между трещинами в периодической системе равно нулю.

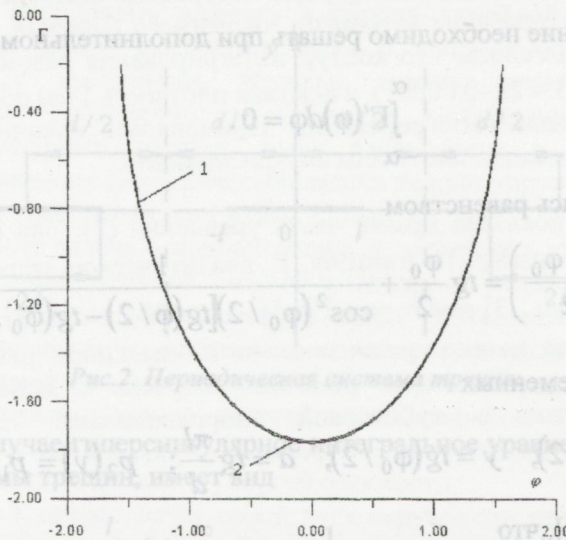


Рис.3. Аналитическое и численное решения уравнения (5).

По найденному аналитическому или численному решению с помощью формул, полученных в [3,9], определяются коэффициенты интенсивности напряжений в пластине, ослабленной периодической системой трещин, что позволяет оценить прочность элементов конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колосов Г.В. Применение комплексной переменной к теории упругости. ОНТИ, М. – Л., 1935, 134с.
2. Габдулахаев Д.В., Душков П.Н. О прямых методах решения сингулярных интегральных уравнений первого рода// Изв. вузов. Математика.–1973.– №7.– С.12-24.
3. Панасюк В.В., Саврук М.П., Дацьшин А.П. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках.–Киев: «Наукова думка», 1976, 444с.
4. Mukhas'kiv V.V., Stapaniuk O.I. Boundary integral analysis of the symmetric dynamic problem for an infinite bimaterial solid with an embedded crack //Mechnica Int. J. Italian Assotiation of Theoretical and Applied Mechanics.– 2001.–V.31.–N4.–P. 479-495.
5. Гандель Ю.В. Введение в методы вычисления сингулярных и гиперсингулярных интегралов. 92 с. Харьков 2000
6. Стрельникова Е.А. Гиперсингулярные интегральные уравнения в двумерных краевых задачах для уравнения Лапласа и уравнений Ламе. //Доповіди Національної Академії Наук України.–2001.–№3.–С.27-31.
7. Еселева Е.В., Науменко В.В., Стрельникова Е.А. Гиперсингулярное уравнение в задаче определения аэродинамических нагрузок на лопасти ветроустановок. // Проблемы машиностроения.–2000 № 6053-4. –С. 62–69.
8. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: Физматгиз, 1963.–1100 с.
9. Михаськив В.В. Моделирование трехмерного нестационарного взаимодействия трещин в упругом теле при помощи функций их раскрытия //Прикладная механика.–2001.–т32.–№1.–С.83-92.
10. Лифанов И.К. Метод сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент в математической физике, теории упругости и дифракции волн. М.: ТОО «Янус», 1995, 520 с.

Modeling of processes of an irradiation for industrial technologies

V.T. Lazurik, V.M.Lazurik, G.F. Popov and Yu.V.Rogov

V.N.Karazin Kharkiv National University, Ukraine

The conception for design of the Radiation-Technological Office (RT-Office) was developed by authors. RT-Office realize computer technologies at all basic stages of works execution on the radiation-technological lines (RTL) using irradiators of electron beam (EB), X-ray and γ -ray. RT Office is the common program shell which provides flexible intellectual interaction between specialized modules and databases for optimal planning of the process of an irradiating and control of its realization. RT-Office is accessible to a broad audience of users without a special knowledge in the field of transport of ionizing radiation and computer technologies. The descriptions of the specialized programs developed by authors ModeRTL, XR-Soft and γ -ray-Soft which are based RT-Office modules and intended for simulation of EB, X-ray, and γ -ray processing respectively are considered in the paper.

1. Introduction

At present the electron beam (EB), X-ray (bremsstrahlung) and γ -ray processing are widely used in different industrial radiation technologies, such as sterilization of medical devices, in particular, for mail sterilization; foodstuffs irradiation; advanced composites modification; cable cross-linking; bulk polymer modification; polymerization of monomers and grafting on monomer onto polymers; tire and rubber pre-cure treatment; decontamination of clinical waste; purification of water and gas wasters, and others. An implementation of radiation technologies in various fields of industry is accompanied by magnification of amount of industrial radiation facilities, expansion of assortment of products treated by an ionizing radiation, development of new methods of radiation processing [1, 2, 3]. Success of the use of ionizing radiation in different radiation technologies depends largely on development of theoretical notions, semiempirical models and computer codes for simulation of irradiation processes on the radiation-technological lines [4, 5, 6, 7].

Now there is no a set of consistent simulation methods for radiation processes which allow to fulfil correct and agreed simulation at all stages of radiation-technological process realization. It is beginning from the expertise of the original characteristics of irradiated product, the characteristics of radiation facility, a control and execution of irradiation process, and ending by accounting documentation about final products with a given range of an absorbed dose.

It is difficult to correctly fulfil a simulation of all sequence of radiation-technological stages, because the availability of many physical models, many stages and many factors should be taken into account in actual processes.

There are the powerful universal packages as ITS, EGS, GEANT, MARS, PENELOPE and others for simulation of electron and photon transport through

arbitrary multielement constructions, which allow to fulfil simulation at separate stages of radiation-technological process [8,9,10,11]. These packages permit obtaining by Monte Carlo method numerical data sets to solve practical problems. The development of the programs for specific radiation-technological processes on basis these packages demands a lot of time, and calculation are carried out long enough.

These packages are just the sets of program blocks accelerating notable coding of Monte Carlo methods for simulation of transport of ionizing radiation through construction. To realize a computer experiment, that one could interpret as the physical one, the scientific elaboration of the physical experiment model is necessary, as well as model error evaluation of results of computer simulation.

With these universal programs only experienced personnel of physicists - the experts in the field of transport of an ionizing radiation through matter, mathematicians, programmers and interpreters of calculations results can work.

There are the fast analytical and semiempirical methods for simulation of radiation processes, which utilize a simplified model for radiation transport. These programs are narrowly specialized and can not give away results of calculations with necessary accuracy for a wide range of problems in the field of radiation technologies. With these programs the experienced personnel can also work only.

It is difficult to carry out scientific validation of obtained results for known calculation packages and procedures. Because the comparisons of prediction within the framework of calculation procedures for simulation results with experimental results at all stages of radiation-technological process are not enough or completely are absent. The problem related with validation and verification of obtained simulation results by the use of various physical models and software packages is one of the key moments for use in practice the simulation methods for radiation-technological processes.

The conception for design of the Radiation-Technological Office (RT-Office) - software tools for EB, X-ray and γ -ray processing was developed by authors [7, 12]. RT-Office is intended for realization of computer technologies at all basic stages of execution of works on radiation-technological lines (RTL). It is beginning from the computer expertise of the original characteristics of irradiated product and radiation facility; a choice of optimum parameters of irradiation regimes and permissible values of a level deviations for automatic control system; a control and execution of irradiation process; and ending by a preparation of a scientifically - justified report on the fulfilled work.

RT-Office is completely correspond to basic positions of the international Standard E2322-02 - "Standard Guide for Selection and Use of Mathematical Methods for Calculating Absorbed Dose in Radiation Processing Applications" [13].

The modules structure, geometrical and physical models of the electron beam (EB), X-ray, and γ -ray irradiators for the programs ModeRTL, XR-Soft, and γ -ray-Soft which were constructed on the base of developed by authors RT-Office modules are considered in the paper more closely.

2. RT-Office consideration

Developed RT-Office is the common program shell, which provides flexible and intellectual interaction between specialized modules and databases for optimum planning of process of an irradiation and control of its realization.

The wide opportunities of the RT-Office are based on the authors developments of last years [7, 12, 14, 15, 16]:

- semiempirical models for dose distribution of an ionizing radiation in spatially non-uniform objects irradiated by electron, X-ray and γ -ray;
- high effective programs for simulating by Monte Carlo method of the irradiation processes in heterogeneous objects;
- models of irradiation processes on industrial radiation facility which includes self-consistent geometrical and physical models of the main functional elements and regimes irradiation for real radiation facility;
- databases for the equipment characteristics and objects used in radiation technologies;
- computer methods of expertise and control of conditions for an irradiation realization;
- the methods validation of theoretical predictions on the basis of comparison of calculation data obtained by different independent simulation methods and/or comparison with experimental results.

The RT-Office includes the list of the following functional modules and databases developed by authors:

- **Module of Monte Carlo simulation** of dose distribution for scanning electron beam into heterogeneous targets.
- **Module of MC simulation** of dose distribution for electron beam into heterogeneous targets irradiated by EB in stationary regimes via scatterer.
- **Module of Monte Carlo simulation** of dose distribution for electron beam into thin dosimetric films.
- **Module for calculation** by special developed semiempirical model of 2-D dose distribution for targets irradiated by scanning electron beam on moving conveyer.
- **Module of Monte Carlo simulation** of charge deposition into heterogeneous targets irradiated by scanning electron beam on moving conveyer.
- **Module of Monte Carlo simulation** of conversion of electron energy to X-ray (bremsstrahlung) energy.
- **Module of Monte Carlo simulation** of dose distribution into heterogeneous targets irradiated by scanning X-ray beam on moving conveyer.
- **Module of Monte Carlo simulation** of dose distribution for cylindrical turntable target irradiated by scanning X-ray beam.
- **Module of Monte Carlo simulation** of γ -ray intensity from distributed source with radionuclides.
- **Module of Monte Carlo simulation** of dose distribution from distributed source with radionuclides in an environment.
- **Calorimetry Module.** Calculation of spatial distribution of radiation-induced temperature and analytical estimations of integral characteristics of a heat transmission for process of cooling of the irradiated products in a thermostable environment.

- **Comparison module.** Methods of mathematical physics for handling and comparative analysis of depth dose curves obtained by different calculation and experimental methods.
- **Dosimetry module.** Specialized tool for entering and processing of experimental dosimetry data and their transmission to the Comparison module.
- **RTL configuration module.** Entering and saving of the operational characteristics for all construction elements of RTL.
- **Wizard for control and validation** of input data for working regimes of RTL.
- **Module for cognitive visualization** of results for 2-D and 3-D view of dose distribution.
- **The processing technologies database** for equipment characteristics and objects used in radiation technologies.
- **Set of service blocks** which provides the interaction between functional modules and databases.
- **Module for the choice of geometrical model for irradiated objects.** This module will be designed in the form of a Database with different geometrical model of irradiated objects, such as tube, tubes package, box with bottles, box with syringes, box with Petry cups, and others. This module is under development.

Simulation and calculation modules of the RT-Office are the basis for construction of the specialized software for EB, X-ray and γ -ray processing [7, 12, 15, 16].

3. Description of the ModeRTL and XR-Soft Programs

An electron accelerator, a scanner of electron beam, a conveyor line, an irradiated product and a package are the major components of the radiation-technological lines (RTL) for EB irradiator. An additional element of RTL for X-ray irradiator is an X-ray converter with cooling system. The detailed physical and geometrical models of the EB and X-ray irradiators were realized on the base of RT-Office modules in the form of new mathematical software: the program ModeRTL for EB and the program XR-Soft for X-ray processing respectively.

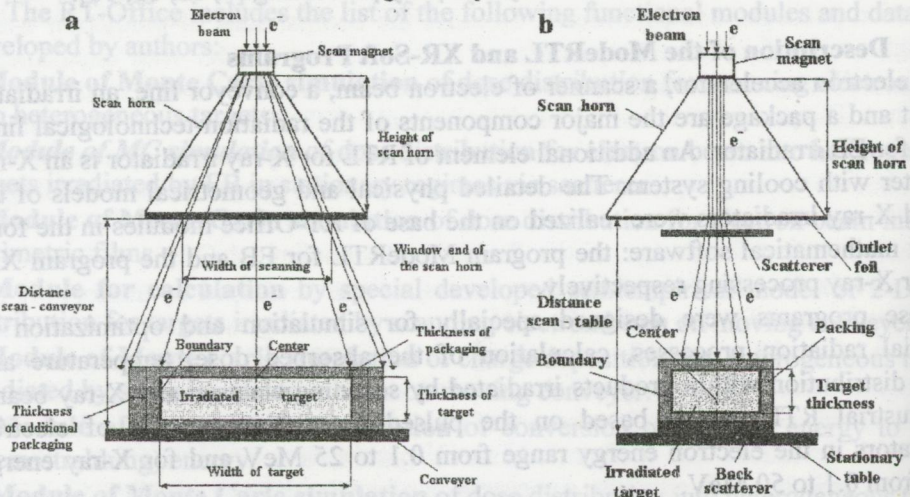
These programs were designed specially for simulation and optimization of industrial radiation processes, calculation of the absorbed dose, temperature and charge distribution within products irradiated by scanning electron and X-ray beams on industrial RTL that is based on the pulsed or continuous type of electron accelerators in the electron energy range from 0.1 to 25 MeV and for X-ray energy range from 0.1 to 50 MeV.

Geometrical models of the EB radiation facility that were used for simulation of EB processing by the program ModeRTL are shown in Figs.1 (a) and (b). Fig. 1 (a) represents EB irradiator which forms a dose field by a scanning EB into heterogeneous target placed on moving conveyer. EB irradiator includes an electron accelerator, a scanner of electron beam, an irradiated product with packaging, and moving conveyer. Fig. 1 (b) represents EB irradiator which forms a dose field in an irradiated target placed on the stationary table by EB via scatterer and back scatterer. The construction elements for this EB irradiator which scatter EB and affect on the dose distribution in an irradiated target are the following: a foil of outlet window of accelerator, an air gap between the foil and a target, scatterer plate placed between the foil and a target, and back scatterer plate placed on the bottom of a target. Two

different functional modules of RT-Office are used for simulation of EB dose mapping in each geometrical model of EB irradiator.

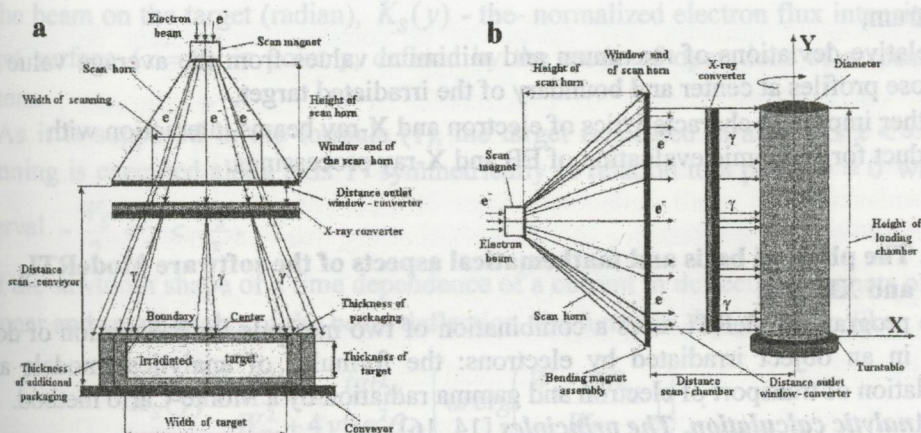
Two geometrical models for X-ray irradiators that were used for simulation of X-ray processing by the program XR-Soft are shown in Figs. 2 (a) and (b). The first X-ray irradiator includes an electron accelerator, a scanner of electron beam, an X-ray converter with cooling system, and an irradiated product with packaging on moving conveyor (Fig.2(a)). The second one includes an irradiated product placed in turntable cylindrical chamber that is rotating in front of the X-ray beam (Fig.2(b)) like Palletron installation [6].

The programs ModRTL and XR-Soft take into account in detail a construction of the RTL and requirements to regimes of irradiation in each specific radiation-technological process. The programs ModRTL and XR-Soft use in the unified calculation scheme of the transport of electron and gamma radiation in materials of different calculation methods, such as analytical, semiempirical and precise - method Monte Carlo (MC). Simulation of EB dose mapping in irradiated target materials was conducted by MC and Analytical methods, for X-ray dose mapping - by MC in 2-dimensional model (2-D). The 2-D dose distribution in the target is represented as function of two coordinates - of the target depth (axis X) and the target width along scan direction (axis Y). Conveyor moves along axis Z. (See Fig.6). Such conditions are realized in many cases for EB and X-ray processing when the target is irradiated at one- and double-sided on the moving conveyor.



Figs. 1 (a) and (b). Schemes of EB radiation facility for target placed on moving conveyor and irradiated by triangular scanning of EB (a) and for targets irradiated by EB in stationary regimes via scatterer (b).

The processing rate and EB and X-ray absorbed dose distribution within of the irradiated materials depend on a lot of parameters for the radiation facility of RTL and characteristics of target material.



Figs. 2 (a) and (b). Schemes of radiation facility with X-ray converter, cooling system and moving conveyor for triangular EB (a) and turntable loading chamber for non-diverging (parallel ray) EB (b).

Input data for the programs ModERTL and XR-Soft are the following:

Parameters of electron beam: average beam current, or pulse duration and repetition frequency in pulsed accelerators, electron energy spectrum, beam diameter and spatial distribution of the beam intensity.

Parameters of scanning system: modes of operation - the triangular or non-diverging irradiation treatment field in target material; height of scan horn and width of scanning; distance scan - conveyor; form of current in magnet of scanning system; repetition frequency of scanning.

Parameters of the X-ray converter with cooling system: geometrical characteristics of the X-ray converter with cooling system, thickness of plates and cooling agent, materials composition.

Parameters of scatterer: geometrical characteristics and elemental composition of the scatterer materials.

Parameters of conveyor line: speed and geometrical characteristics.

Parameters of irradiated product: geometrical characteristics of the irradiated product; elemental composition of the target; material and size of the covering for irradiated product.

Regimes of target irradiation: one- and two-sided irradiation on moving conveyor by electron or X-Ray beams; irradiation of turning target by X-ray beams; EB irradiation of target which is stationary in the irradiated zone.

Output data. For searching optimum solutions, the programs ModERTL and XR-Soft calculates and represent via "Module for cognitive visualization" the following parameters:

- in convenient for comparative analysis graphic and tabular forms, the spatial distributions of an absorbed dose, charge and temperature in an irradiated targets;
- maximum, minimum and average values of an absorbed dose;
- total energy transmitted to the irradiated targets;
- factor of utilization of beams power;
- electron ranges;
- the conversion efficiency from electron beam to X-ray for converter and X-ray

spectrum;

- relative deviations of maximum and minimum values from the average value for dose profiles at center and boundary of the irradiated target,
- other important characteristics of electron and X-ray beams interaction with product for economic evaluation of EB and X-ray processings.

4. The physical basis and mathematical aspects of the software ModERTL and XR-Soft

The program ModERTL uses a combination of two methods for calculation of dose field in an object irradiated by electrons: the formulas of analytical models and simulation of transport of electron and gamma radiation by a Monte-Carlo method.

Analytic calculation. The principles [14, 16].

It is supposed, that the process of scanning ensures a quite high uniformity of the electrons flux on all surface of the target. It is achieved in a case, when the scan frequency f , the target driving velocity V and effective beam diameter d satisfy the following condition $V \ll d \cdot f$ and the width of a scanning zone W_S exceeds the width of the target W_T on magnitude, more than on $2d$ i.e. $W_S > W_T + 2d$. Within the framework of this supposition, the spatial dose distribution in the target does not depend on scan frequency and beam diameter. Besides, the model does not take into account boundary and edge effects at description of the spatial dose distribution.

The semiempirical model.

In semiempirical model, the analytical relations for dependence of dose $D(x, E)$ on depth x in a semi-infinite target uniformly irradiated with the normally incident beam of monoenergetic electrons with energy E are used [17]. The computational scheme for an one-dimensional spatial dose distribution $D(x, E)$ was implemented in the program EMID [14]. The comparison of results of analytical calculations with results of simulation by the Monte Carlo method by the program ITS shows a small data discrepancy (less than 3 %) for energies of electrons E from 0.1 MeV up to 20 MeV and materials of a target with the atomic numbers Z from 4 up to 92 [14]. The generalization of one-dimensional model is carried out in the supposition of a smallness of an electron cross deviation in comparison with its path length in substance.

The analytical expressions for calculation of two-dimensional spatial dose distribution can be submitted in a form

$$D(x, y, E) = \frac{10^3 I W_T \cdot K_S(y) D(x/\cos\theta, E)}{W_S V (W_T + 2x \cdot \operatorname{tg}\theta_M) \cos\theta}, \quad (1)$$

$$\cos\theta = \frac{W_T}{\sqrt{W_T^2 + 4y^2 \operatorname{tg}^2\theta_M}},$$

where I is the beam current (μA), V - the conveyor velocity (cm/sec), W_S - the width of scanning (cm), W_T - the target width (cm), θ_M - the maximum angle of incidence

of the beam on the target (radian), $K_S(y)$ - the normalized electron flux intensity on target surface ($x = 0$) in point y , defined by the mode of operations of a scanning system.

As it is supposed in the formula (1), the target is located in area $0 \leq x < \infty$ and scanning is executed along axis Y symmetrically in relation to a point $y = 0$ within interval $-\frac{W_S}{2} < y < \frac{W_S}{2}$.

At the sawtooth shape of a time dependence of a current in deflecting magnets of the scanner and small angles of the beam deflection, the function $K_S(y)$ looks like:

$$K_S(y) = \frac{W_T W_S \cdot \text{tg} \theta_M}{W_T^2 + 4y^2 \text{tg}^2 \theta_M} \left(\text{arctg} \left(\frac{W_S \cdot \text{tg} \theta_M}{W_T} \right) \right)^{-1}. \quad (2)$$

The absorbed dose within the irradiated target with account the cover box thickness h , the energy spectrum ΔE and angular $\Delta \theta$ distributions of electrons in the beam $D(x, y, E, h, \Delta E, \Delta \theta)$ is calculated by formula [15, 16]:

$$D(x, y, E, h, \Delta E, \Delta \theta) = \frac{1}{4\Delta E \Delta \theta} \int_{E-\Delta E}^{E+\Delta E} dE' \int_{\theta-\Delta \theta}^{\theta+\Delta \theta} D(x, y', E', h) d\theta', \quad (3)$$

where $x_h = hp_s/\rho$, ρ_s , ρ - density of substance of object and cover, correspondingly, the variables y, y' are related to variables θ, θ' by equation (1).

The atomic number Z^* and the atomic weight A^* to be used for compounds and mixtures are given by the following formulas:

$$Z^* = \left(\sum_{i=1}^M \frac{w_i Z_i^2}{A_i} \right) / \left(\sum_{i=1}^M \frac{Z_i}{A_i} \right), \quad A^* = \left(\sum_{i=1}^M \frac{w_i Z_i^2}{A_i} \right) / \left(\sum_{i=1}^M \frac{Z_i}{A_i} \right)^2, \quad (4)$$

where w_i denotes the fraction by weight of the i -th constituent element with atomic number Z_i and atomic weight A_i .

Monte Carlo simulation. The principles [15, 16].

It is supposed, that the scanning process ensures sufficient uniformity of dose distribution in the target along direction of the conveyor moving. It is valid, when the scan frequency f is sufficiently great, so $f \gg \frac{V}{d}$. Here V is the conveyor velocity,

d - effective diameter of the beam. In this case, dose distribution in the target can be represented as function of two coordinates (two-dimensional spatial distribution) - of depth in the target (X axis) and of displacement along direction of scanning (Y axis).

Physical model.

This is a few decades as the Monte Carlo method applies successfully to calculate spatial electron dose distributions in various objects, therefore physical models of calculation are well known today. The following elementary processes are traditionally taken into account: elastic scattering of electron on atom, inelastic collision of electron with atomic structure, generation of electron and generation of

bremsstrahlung quantum. For realization of computer experiment on transition electrons through matter, a scheme of grouping of collisions is used.

A basis of this scheme of construction of branching trajectories (i.e. with accounting of secondary particles) is the separation of electron interactions on two classes: "close" and "far" collisions. Last are defined as collisions with small energy transmissions and small deflection angles of electrons. They are grouped, i.e. are described in the approximation of multiple scattering. The collisions with considerable energy transmissions or with considerable deflection angles are featured as separate events (the "close" collisions) [18, 19].

Free parameters of the accepted scheme to be determining separation of collisions are the critical energy E_C and the critical scattering angle θ_C . The limiting case $E_C \rightarrow 0$ and $\theta_C \rightarrow 0$ corresponds to a scheme of individual collisions. This scheme allows obtaining results with small model error, but requires huge expenditures of machine time for obtaining of an acceptable statistical error. Other limiting case $E_C \rightarrow E$ and $\theta_C \rightarrow 2\pi$ corresponds to the scheme of the condensed collisions. This scheme allows quickly receiving statistically valid results, but has several essential errors.

On the basis of equations for description of elementary processes, the algorithm of simulation of electron transition through matter is created. A scheme of grouping of collisions is implemented with the following parameters: the critical energy E_e of electron formation, the critical energy E_p of bremsstrahlung quantum formation and critical angle θ_c of elastic scattering of electron on atoms. For construction of the electron trajectory, a free parameter E_s of the scheme is specified. This parameter - energy of stopping of electron - is determined by field of applicability of used descriptions of elementary processes.

The necessity of introducing of the averaging domain for calculation of spatial distributions of physical quantities is the feature of the Monte Carlo method. For calculation of the spatial dose distribution, sizes of a domain of averaging of energy, which is transmitted in the act of electron-matter interaction, are specified. (The set of free parameters Δh_i).

The features of the MC method.

The specially designed analytical interrelations are used for the reasonable choice of free parameters of the physical model for adjusting statistical and model errors of computer experiment and minimizing time of calculation for obtaining of data with a given accuracy.

The feature of implemented statistical estimation of the dose distribution is the use of the method of translations in some spatial domains of the object. This method is used in regions, where variation of magnitude and direction of the electron flux leads to dose variation to be smaller than the established model error. The sizes of these regions are determined according to expert equations, on the basis of parameters of irradiation process and the established model error for obtained results.

A feature of sampling of initial values of electron parameters is randomization of the scanning process. It simplifies procedure of generation of random values of

parameters and allows correctly estimating required time for realization of statistical experiment.

Features of realization of a physical model for X-ray processing are the following:

- The use of a forced method for process of producing X-ray on each step of design of electron track in a construction of the X-ray converter.
- The automatic choice of self-consistent parameters is used for simulation of an electron - photon shower. The choice is based on determination a minimum machine time for obtaining given accuracy. These parameters are the following: cutoff energy for modeling of an electron track, threshold energy of catastrophic electron-electron collisions, cutoff energy for modeling of a photon track, threshold angle of grouping electron collisions for modeling of scattering.
- The use of both a simple estimation (collision method) and the special estimation (method of crossing area) for the dose calculation.

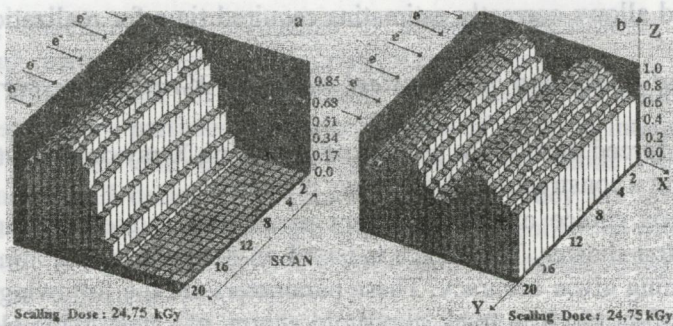
At implementation of the simulation MC methods the specially designed schemes which allow to reduce a running time for receiving of the end results in about hundreds time were applied.

5. Simulation of industrial EB processing by the program ModeRTL

One of the most important characteristics for all radiation-technological processes is the absorbed dose in an irradiated materials. For each product to be treated in the EB and X-ray irradiation facility, there will usually be a minimum dose limit $D_{min-tim}$ to obtain the desired effect and a maximum dose limit $D_{max-tim}$ to avoid product degradation. Value of an absorbed dose necessary for realization of the EB and X-ray processing, the required level of uniformity of an absorbed dose in volume of the irradiated product determine efficiency and productivity of the technological process.

The examples of simulation of a dose field formation in polymer modified wood (PMW) irradiated by electron and X-ray beams are considered in chapters 5 and 6. PMW is a new type of composite materials manufactured by impregnation of inexpensive soft kinds of wood with synthetic monomers or oligomers and subsequent radiation polymerization [3]. All given below figures are captured directly from the interface of the programs ModeRTL, XR-Soft, and γ -ray-Soft.

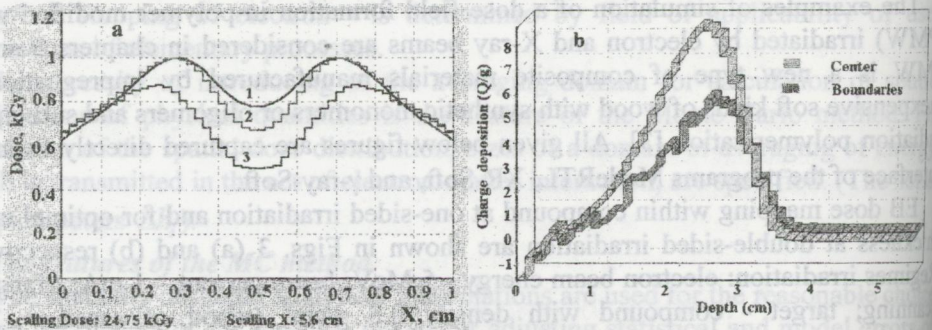
EB dose mapping within compound at one-sided irradiation and for optimal target thickness at double-sided irradiation are shown in Figs. 3 (a) and (b) respectively. Regimes irradiation: electron beam energy - 5 MeV; beam current - 1 mA; triangular scanning; target - compound with density 0.8 g/cm^3 (wood of aspen + 70% polymethylmethacrylate); width of target - 100cm; width of scanning -100cm; conveyer speed -1cm/s. Target has not cover box. A current in magnet of scanning system has the saw-tooth form. This current form is often used in scan magnet of industrial electron accelerator. The optimal thickness for maximum dose uniformity for electron beam in compound is 5.6 cm relatively of dose distribution at the center of a target.



Figs. 3 (a) and (b). 3D-view of the EB dose mapping within compound at one-sided irradiation (a) and for optimal targets thickness at double-sided irradiation (b). Statistical deviations: in the center target - 0,3% and in the boundaries - 2,5%. (Running time is about 7 minutes on PC AMD-K7, 750 MHz).

The compare results for EB depth-dose distributions in a plane, which cross the center (curves 1, 2) in the direction of moving conveyer, and the boundaries (curve 3) of an irradiated target at the end of scan beam direction (see Fig. 3 (b)) at double-sided irradiation are shown in Fig. 4 (a). Curves 2 and 3 simulated by MC method, curve 1 - by Analytical method. As is seen from Fig. 4 (a), the good agreement between depth-dose distributions in a plane, which cross the center calculated by Analytical method (curves 1) and simulated by MC method (curve 2) is observed. It allows to use Analytical method for fast optimization of irradiation regimes and integrate it in control system of radiation facility [15, 16].

The simulation results by MC method of the charge deposition in the center and the boundaries of compound irradiated by 5 MeV electron beam are presented in Fig.4(b).



Figs. 4 (a) and (b). The compare results for EB depth-dose distributions in a plane, which cross the center (curves 1, 2) in the direction of moving conveyer, and the boundaries (curve 3) of an irradiated target at the end of scan beam direction at double-sided irradiation (a).

Charge depositions in the center and the boundaries of compound irradiated by 5 MeV electron beam (b).

As it is seen from Figs. 3(a) and (b) and Fig.4 (a), the EB depth-dose distribution within compound has minimal value on the boundaries of a target along direction of the scanning electron beam and maximal value at plane that cross the target center in direction of moving conveyer.

From standpoint of the dose limits, the minimum dose limit $D_{min-lim}$ must be chosen as a minimum dose value $D_{min-bound}$ on the boundaries of an irradiated target, the maximum dose limit $D_{max-lim}$ - as a maximum dose value $D_{max-center}$ in the target center. In this case the dose uniformity ratio will be determined for all irradiated volume as $DUR_V = D_{max-center}/D_{min-bound}$.

As evident from simulation results and Figs. 3 (a) and (b) and Fig. 4 (a) for the center of a target the EB dose uniformity ratio $DUR = D_{max}/D_{min}$ is 1.51. For the target boundaries at the end of scan beam direction the DUR is 2.12. As a result, the dose uniformity for all irradiated volume DUR_V is 2.7. This value is greater than $DUR = D_{max}/D_{min}$ for the targets center. EB dose uniformity ratio DUR_V can be decrease by decreasing of the optimal target thickness, or by the choice of the special shape of current in scan magnet, or with help of special filters [15, 20].

The anomalies of depth-dose distribution on boundary of two materials at orientation in parallel with incident electron beam were predicted by computer simulation with use ModeRTL software [21]. Experiments were conducted on radiation-technological line LAE 13/9 to validate computer simulation results. Cellulose Triacetate (CTA) dosimetric film (FTR-125) in form of strips were inserted between two blocks at various combinations of materials (Al, wood, PE). Such heterogeneous targets were irradiated by scanned electron beam on moving conveyer.

Validation of computer simulation predictions of an irradiation process with use of the software ModeRTL was fulfilled by comparison with results of CTA films measurements. The anomalies predicted by simulation methods on curves of depth-dose distribution near to boundary of two materials with different densities were experimentally confirmed. Both used materials (Al, PE, wood, CTA film) and radiation facility on basis of the LAE 13/9 are typical for a series of radiation technologies. It was established, that the boundary anomalies of a dose can be realized at radiation processing of heterogeneous materials. Investigation of those anomalies can be used to estimate the quality of an irradiation fulfilled on RTL. It is shown that an application of designed software ModeRTL for planning of irradiation on RTL and interpretation of results obtained by dosimetric film is correct, useful and in a series of cases, it is necessary in practical activity.

6. Simulation of industrial X-ray processing by the program XR-Soft

X-ray beam was generated by scanning electron beam with electron energy 5 MeV in a tantalum converter. Fig.5 represents the X-ray spectrum for 5 MeV electron beam in tantalum converter. Converter construction includes the tantalum target plate with thickness 1.2 mm, the cooling water channel - 2mm, and the aluminum backing plate - 5.0 mm. The X-ray yield in the forward direction for 5 MeV electron is 8.62%.

X-ray dose mapping within compound (wood of aspen + 70% PMMA) with density 0.8 g/cm³ for optimal target thickness at double-sided irradiation for saw-tooth and special forms of current in scan magnet are shown in Figs. 6 (a) and (b) respectively. The optimal thickness of compound for maximum X-ray power utilization is 38.5cm relatively of dose distribution at the center of a target. X-ray beam power utilization in this case is 58%.

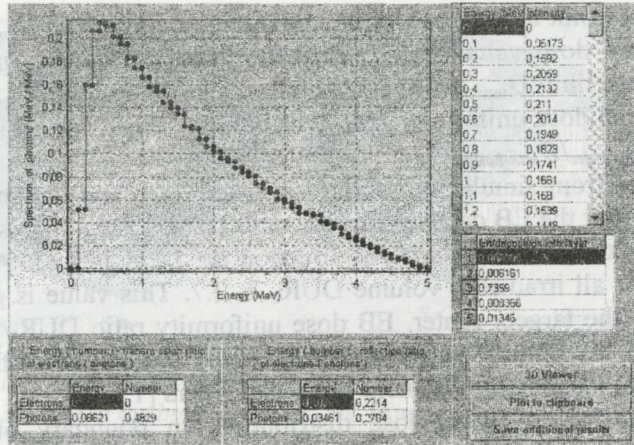
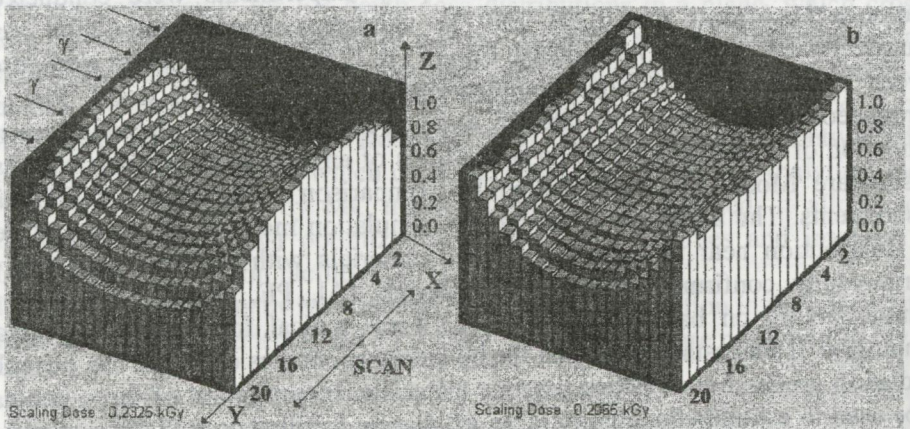


Fig. 5. X-ray spectrum for 5 MeV electron in tantalum converter.



Figs. 6(a) and (b). X-ray dose mapping within compound for optimal target thickness and for the saw-tooth form of current (a) and the special form of current (b) in scan magnet. Statistical deviations: 2.2 % for center target and 2.5% for boundary target along direction of the scanning X-ray beam. (Running time is about 8 minutes on PC AMD-K7, 750 MHz).

The compare results for X-ray depth-dose distributions in a plane, which cross the center (curve 1) in the direction of moving conveyer, and the boundaries of an irradiated target at the end of scan beam direction (see Fig. 6 (a) and (b)) at double-sided irradiation for saw-tooth (curve 3) and special forms (curve 2) of current in scan magnet are shown in Fig. 7.

As is seen from Figs. 6(a) and (b) and Fig. 7, the X-ray depth-dose distribution within compound has minimal value on the boundaries of a target along direction of the scanning X-ray beam and maximal value at plane that cross the target center. For the center of a target the dose uniformity ratio $DUR = D_{max}/D_{min}$ is 1.53. For the target boundaries the DUR is 1.94. As a result, the X-ray dose uniformity for all irradiated volume of compound DUR_V is 2.91.

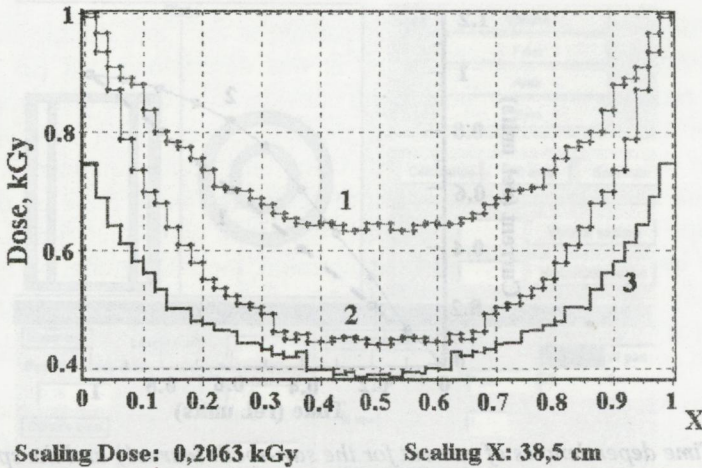


Fig. 7. 2D-view of the X-ray depth-dose distributions in the center (curve 1) and in the boundaries of a target at the end of scan beam direction for saw-tooth (curve 3) and special forms (curve 2) of current in scan magnet.

Significant dose gradient in volume of irradiated target can be decrease by the choice of the special shape of current in scan magnet. Changing of the current shape in scan magnet results in change a time dependence for electrons intensity along a direction of scanning in front of an X-ray converter [15, 16, 22]. By the use the program XR-Soft, the special shape of current in scan magnet which provide the maximum uniformity for X-ray dose distribution in the irradiated compound was determined.

Fig. 8 represent the time dependencies of current in scan magnet for the saw-tooth shape of current (curve 1) and the special shape of current (curve 2). The X-ray dose distribution determined by the special current shape (curve 2) is shown in Fig. 6 (b). X-ray beam power utilization in this case is 53%, the value DUR_V is 2.1 and also is greater than DUR in the target center. Further decreasing of the target thickness at double side X-ray treatment results in decreasing both the value DUR_V and the X-ray power utilization. For example, for compound thickness $h=30\text{cm}$ the DUR_V is 2.0 for saw-tooth shape of current (curve 1) and the DUR_V is 1.6 for the special shape of current (curve 2). In this case the X-ray power utilization is 48%.

Most effectively X-ray processing can be realized by treatment of turning loading chamber with irradiated materials which is placed in front of scanning X-ray beams (see Fig. 2(b)). In this case at given value DUR_V an optimal material thickness for X-ray processing will be greater than for double-sided irradiation. The program XR-Soft allows to simulate a dose mapping in turning cylinder chamber with materials irradiated by scanning X-ray beam. The direction of scanning X-ray beam is in parallel with a cylinder axis. For above compound with density 0.8 g/cm^3 and X-ray parameters, for the value $DUR_V = 1.54$, the optimum diameter D_{\max} for the treated material is 60 cm.

The results of some examples of simulation of radiation processing show, that program Model and XR-Soft are very useful for the simulation analysis of EB

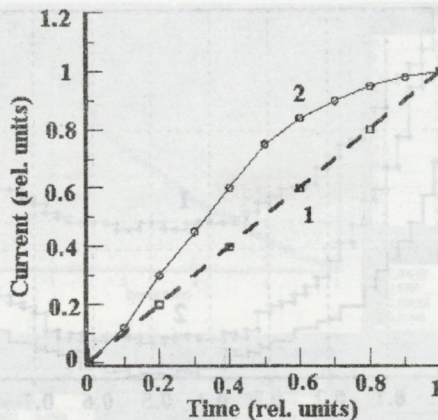


Fig. 8. Time dependencies of current for the saw-tooth (curve 1) and the special shape of current (curve 2) in scan magnet. One-quarter of current time period.

As this takes place, a non-uniformity equalization for X-ray dose distribution along a direction of scanning on the ends (boundaries) of a turning cylinder chamber was conducted by the choice of the special shape of current in scan magnet. It was done by the same method that was used above for double-sided irradiation. Without usage this method, the DUR_{γ} is 2.2 because of the non-uniformity effects on the cylinder boundaries for the X-ray dose distribution.

Therefore the analysis of X-ray dose mapping must be conducted with consideration of the dose non-uniformity not only in the target center but also on the boundaries of an irradiated target.

As a minimum, the 2-D simulation model for EB and X-ray dose mapping must be used for correct analysis of the optimum product thickness, power utilization, max/min dose ratio, and processing capacity.

The validation and verification of the results simulated by the programs ModeRTL and XR-Soft were carried out in compare with theoretical calculated data, with results obtained by the universal packages such as ITS, EGS, GEANT and PENELOPE, and some experimental data of authors and data in published work [4, 20, 23]. The comparison investigations indicated that the developed physical and mathematical models are reliable and correct, and the programs ModeRTL and XR-Soft are accurate and easily accessible for users.

7. Program γ -ray-Soft for simulation of γ -ray irradiator

The special problem for the program γ -ray-Soft is the shielding analysis from a source with a radioactive wastage. Simulation of γ -ray characteristics from a large source with distributed radionuclides and simulation of spectrum and dose distribution from a distributed source in an environment was performed by Monte Carlo method.

Fig. 9 represents a geometrical scheme of γ -ray irradiator. Fig. 10 (a) represents the spectrum γ -ray from barrel with radionuclide ^{60}Co ($E_{\gamma} = 1.25 \text{ MeV}$). Fig. 10 (b) represents the dose map in an air around the barrel with radionuclides.

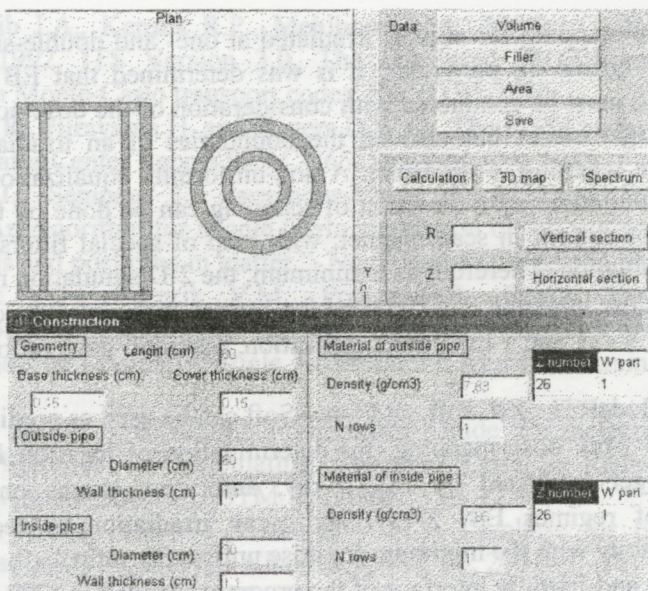
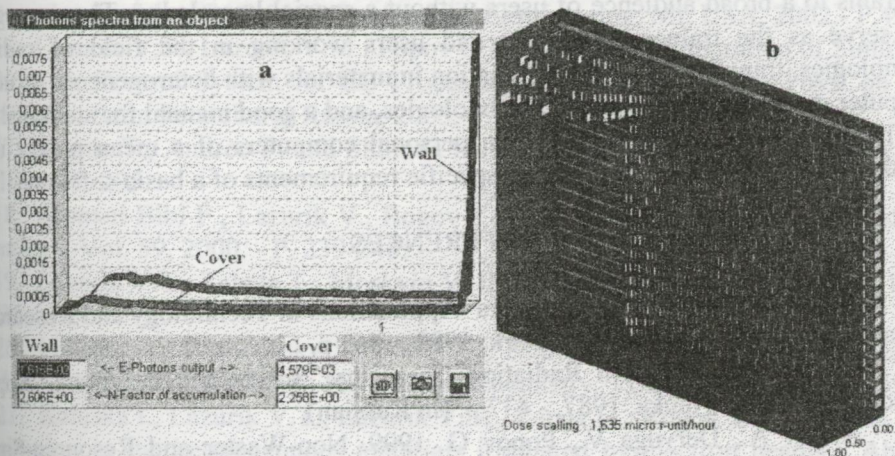


Fig. 9. Geometrical model of the γ -ray irradiator.



Figs. 10 (a) and (b). Spectrum of γ -ray from barrel with radionuclide ^{60}Co (a). Dose Map in an air around the barrel filled with radionuclide ^{60}Co (b).

The program γ -ray-Soft can be used for the dose distribution mapping in γ -ray processing of medical device or foodstuff in the multi-pencil type of γ -ray irradiator.

7. Conclusion

The functional modules of the RT-Office can be used as the basis for designing of the software for decision of special tasks in different radiation-technological processes. Specialized software for EB, X-ray, and γ -ray processing in the form of the programs ModeRTL, XR-Soft and γ -ray-Soft were developed on the basis of simulation and calculation modules of the RT-Office.

The results of some examples of simulation of radiation processing show, that programs ModeRTL and XR-Soft are very useful for the simulation analysis of EB

and X-ray dose mapping for objects irradiated at one- and double-sided by scanning EB and X-ray beams. In particular, it was determined that EB and X-ray dose uniformity ratio must be conducted with consideration of the dose non-uniformity not only in the target center but also on the boundaries of an irradiated target along direction of the scanning X-ray beam. A non-uniformity equalization for EB and X-ray dose distribution along a direction of scanning can be done by the choice of the special shape of current in scan magnet, with help of special filters, or with special methods of irradiation. Therefore as a minimum, the 2-D simulation model for EB, X-ray, and γ -ray dose mapping must be used for correct analysis of the optimum product thickness, EB, X-ray and γ -ray power utilization, max/min dose ratio, and processing capacity.

Programs ModeRTL, XR-Soft, and γ -ray-Soft can be used as predictive tools for EB, X-ray and γ -ray dose mapping, for determination of location D_{min} and D_{max} in volume of target irradiated by EB, X-ray, and γ -ray beams on RTL, and for optimization of regimes EB, X-ray, and γ -ray irradiation to receive maximum processing capacity with the minimum for dose uniformity ratio.

The flexible and friendly interface of the programs ModeRTL, XR-Soft and γ -ray-Soft is realized in the Windows environment. It allows effectively to use these programs to a broad audience of users without a special knowledge. These programs can serve as the trainer course for end users working in the field of radiation technologies, transport of ionizing radiation in materials with heterogeneous structure, computer modeling of systems and technologies, and a good manual for students.

The RT-Office can be installed on personal computers of a mean power under Windows 98/NT/Me/XP, there are no specific requirements of a basic software.

REFERENCES

1. Scharf W. Particles Accelerators -Applications in Technology and Research. Research Studies Press Ltd., New York, 1989. - 663 p.
2. Pikaev A.K., Modern Radiation Chemistry, Solids and Polymers. Applied Aspects. - Moscow: Nauka, 1987. - 437 p. (in Russian).
3. Avilov A., Deryuga V., Popov G. 1999. Non-Waster and Resource-Saving Radiation Process of Polymer Modified Wood Production. PAC'99, 4, 2549-2551.
4. Meissner J., Abs M., Cleland M.R., Herer A.S., Jongen Y., Kuntz F. and Strasser A. X-ray treatment at 5 MeV and above. Radiation Physics and Chemistry 57, 2000.- P.647-651.
5. Weiss D. E., Stangeland R.J. Monte Carlo simulation models for 3-D electron beam dose mapping. Comparison of dose predictions with dosimetry. Radiation Physics and Chemistry 66, 2003.- P.223-235.
6. Jongen Y. An X-Ray High Dose Uniformity Pallet Irradiator.// Abstract book of the 6th Gamma Processing Seminar. Ottawa. Canada.- 2002.
7. Lazurik V.T., Lazurik V.M., Popov G.F., Rogov Yu. Software tools for optimization of industrial EB and X-ray processing.// Proc. of the 7-th Intern. Conf. on Electron Beam Technologies, EBT 2003, Varna, Bulgaria, 2003.- P. 616-622.
8. Brun R., Bruyant F., Maire M., McPherson A.L., GEANT-3, Data handling division DD/EE/84-1, CERN, 1987.

9. Hableib J.A., Kensek R.P., Mehlhorn T.A., Valdez G., Seltzer S.M., and Berger M.J., 1992. ITS Version 3.0, The integrated TIGER series of coupled electron/photon Monte-Carlo transport codes. SAND 91-1634.
10. Nelson R., Hirayama H. and Rogers D.W.O., The EGS4 code system. Stanford Linear Accelerator Center Report SLAC-265, Stanford, CA, 1985.
11. Baró, J., Sempau, J., Fernández-Varea, J. M., and Salvat, F., 1995. PENELOPE: An algorithm for Monte Carlo simulation of the penetration and energy loss of electrons and positrons in matter.”, Nucl. Instrum. Methods, B 100, 31-46.
12. Lazurik V.T., Lazurik V.M., Popov G.F., Rogov Yu. Rt-Office for Optimization of Industrial EB and X-Ray Processing.// Abstract book of the XVIII Intern. Workshop on Charged Particle Accelerators. Alushta, Ukraine, 2003.-P. 209-210.
13. ASTM Standard E2322-02 - “Standard Guide for Selection and Use of Mathematical Methods for Calculating Absorbed Dose in Radiation Processing Applications”. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 12.02.
14. Lazurik V.M., Tabata T., Lazurik V.T. A Database for Electron-Material Interactions. Radiation Physics and Chemistry, Vol. 60, 2001.- P. 161-162.
15. Lazurik V.T., Lazurik V.M., Popov G.F. and Rogov Yu.V. The Software ModeRTL for Simulation of Radiation Processes in Electron Beam Technologies, Abstract book of the ICAP-2002 Conference. East Lansing, MI, USA, 2002.- P.49.
16. Lazurik V.T., Lazurik V.M., Popov G.F., Rogov Yu. Integration of Simulation Methods in Control System for EB Processing.//Proceedings of the PhysCon 2003 Conference, Saint Petersburg, Russia, 2003.-P. 1003-1008.
17. Tabata T., Andreo P. and Shinoda K., Radiation Physics and Chemistry, Vol. 53, 1998.- P. 205.
18. Alouani Bibi F., Lazurik V., Rogov Yu. and Tabata T. Radiation Physics and Chemistry, Vol. 59, 2000. - P. 239-248.
19. Lazurik V.T., Tabata T., Moskvina V. IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol.45(3), 1998.- P. 626-631.
20. Lisitsky A., Pismenesky S., Popov G., Rudychev V. Quality improvement of irradiating technique. Radiation Physics and Chemistry, Vol. 63, 2002.- P. 591-594.
21. Kaluska I., Lazurik V.T., Lazurik V.M., Popov G., Rogov Yu., Zimek Z. Dose distribution in the heterogeneous materials irradiated by electron beams.// Abstract book of the XVIII International Workshop on Charged Particle Accelerators. Alushta, Ukraine, 2003.-P. 209-210.
22. Pismenesky S., Popov G., Rudychev V. Reproduction of a given particle distribution by means of scanner. Radiation Physics and Chemistry, Vol. 63, 2002.- P.601-604.
23. Cleland, M.R., and Pageau, G.M., “Comparisons of X-Ray and Gamma-Ray Sources for Industrial Irradiation Processes,” Nucl. Instrum. Meth., B 24/25, 1987.-P. 967-972.

Прикладной язык семантической структуризации научных текстов как некоторая проекция языка Ада

В. О. Мищенко

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Украина

This work proves that it is possible to develop an applied language for semantic structuring of scientific documents (LSS) based on the appropriate projection of the Ada language. (The author introduced the projection concept for languages defined by their formal grammar onto the given nonterminal subset along the given subset of this grammar's rules earlier.) Not equality but absolute correspondence between the syntax of the developed LSS and the syntax of the given projection of the Ada language has been found. Thereby, it is possible to realize the developed LSS on the basis of standard information technologies related to Ada.

1. Семантическая структуризация научных текстов и постановка задачи о расширении языков семантической структуризации (ЯСС)

Налаживание работы с информационными системами научных направлений через Интернет весьма актуально, как для представляющих эти направления учёных, так и для целей обучения, особенно по программам магистратуры и аспирантуры. При этом информационные системы направлений, зависящих от быстрого развития исследовательского программного обеспечения, должны обладать определёнными особенностями, рассмотренными в [1]. Настоящая работа относится к вопросам новых специальных информационных технологий, необходимых для создания и эксплуатации информационных систем указанного вида.

Для описания смысловой структуры совокупности научных текстов в рамках информационной системы научного направления было предложено использовать систему связей, построенную по образцу межмодульных связей в программах на языке Ада [1]. В качестве средства моделирования переноса средств структуризации языка программирования на специальные научные тексты было введено понятие проекции языка, определяемого формальной грамматикой, на заданное подмножество нетерминалов вдоль заданного подмножества правил этой грамматики. Реальным примером использования такой модели переноса служит очень простая проекция контекстно-свободного синтаксиса языка Ада, предложенная в [2]. Эта проекция определила модель семантической структуризации информационной системы научного направления для этапа начального наполнения базы данных такой системы. Отметим, что, трактовка проекции существующего языка как средства создания новых специализированных языков не противоречит абстрактному понятию проекции языков [3].

Модель семантической структуризации [2] позволяет отразить связи таких материалов, как статьи и книги, между собой, а также выделить структурные единицы - модули внутри материалов. Актуально и практически важно

расширить модель в первую очередь за счёт добавления средств отражения связей между любыми модулями, включая внутренние модули одного и того же материала. Проекция формального языка (в нашем случае контекстно-свободного синтаксиса языка программирования Ада) легко трактуется как формальный синтаксис для языка разметки текстов (в данном случае научных). При этом определение проекции в [2] ориентировано на то, чтобы интерпретировать контекстные ограничения синтаксиса языка Ада в качестве контекстных ограничений для синтаксиса языка разметки, порождаемого проекцией Ады. Таким образом, полностью определяется синтаксис языка семантической структуризации текстов – ЯСС. Версию такого языка, определённую в [2], обозначим индексом 1.0. Отметим, хотя это не тема данной статьи, что семантика подобных ЯСС в значительной степени должна опираться на статическую семантику исходного языка (языка программирования Ада). А именно, семантика языка, полученного проекцией, должна определяться в тесной связи с интерпретацией его нетерминалов, как понятий, применимых к научным текстам и, насколько возможно, аналогичных понятиям, обозначаемым этими нетерминалами в статической семантике языка Ада.

Если теперь вернуться к ЯСС, определённом в [2] через проекцию, то ясно, что при его расширении в соответствии с нуждами прикладного использования, полученный расширенный ЯСС может и не быть никакой проекцией языка Ада. Это поставило бы под сомнение корректность системы контекстных ограничений расширения (поскольку эта система не вытекала бы из такой системы для заведомо корректного языка) и противоречило бы концепции рассматриваемых информационных систем [1]. Последнее связано с тем, что в базах данных интересующих нас информационных систем научные тексты должны храниться на равных правах с исходными текстами программного обеспечения, и запросы о семантических связях должны выявлять межмодульные и прочие связи независимо от того, идёт ли речь о связях текстовых или программных модулей.

Поэтому ставится задача построения расширенного ЯСС с вышеуказанными пользовательскими качествами так, чтобы правила его формального синтаксиса соответствовали правилам формального синтаксиса языка-прототипа, в данном случае – Ады. Соответствие здесь понимать, как такое, которое даёт возможность однозначного переноса необходимых контекстных ограничений из прототипа в ЯСС.

2. Обоснование корректности ЯСС методом последовательных сравнений с проекциями языка Ада

Воспроизведём и немного расширим понятие проекции языка в смысле [2].

Пусть

$$G = (T, N, S, n_0) \quad (2.1)$$

– формальная КС-грамматика, обеспечивающая однозначность синтаксического разбора (в терминологии [4]) и определяющая основу синтаксиса для языка P (языка-прототипа ЯСС). Здесь T, N, S – множества, соответственно, терминалов, нетерминалов и грамматических правил, а n_0 – нетерминал. Множество фраз, выводимых из n_0 , обозначим P_0 . Синтаксически правильные фразы языка-

прототипа P отбираются из P_0 с учётом контекстных ограничений, которые в практике широко используемых языков программирования излагаются на естественном языке.

Пусть N_1 - подмножество N , содержащее n_0 . «Ортогональную» проекцию P на N_1 определит подмножество правил S_{N_1} , полученное из S исключением тех правил, в которых слева от символа непосредственного вывода « \rightarrow » фигурируют нетерминалы, не принадлежащие N_1 . Исходя из прикладных соображений, можно использовать какую-то другую проекцию на N_1 , сужая S_{N_1} так, чтобы в оставшемся множестве S_0 для каждого p из N_1 осталось хотя бы одно правило вида $p \rightarrow \alpha$ с непустой цепочкой α .

Сформируем T_1 , добавляя в T новый терминал $@$ («замещение»). Множество S_1 образуем, исходя из S_0 , так. Для всякого вхождения в правила, принадлежащие S_0 , какого-то нетерминала p , не принадлежащего N_1 добавляем к правилам из S_0 правило

$$p \rightarrow @ \quad (2.2)$$

Формально под «проекцией» P_1 языка P «на» N_1 «вдоль» S_1 будем понимать язык, порожденный грамматикой

$$G_{S_1} = (T_1, N_1, S_1, n_0) \quad (2.3).$$

Из подобной проекции можно интерпретацией получить язык разметки текстов. Последние представляют собой последовательности фраз «естественного» языка L . Так у нас L - язык научных текстов, допускающий, в частности, и формулы. Интерпретация грамматики (2.2) чисто формальна: символ $@$ переводится из разряда терминалов в нетерминалы, но добавляются грамматические правила вида

$$@ \rightarrow I \quad (2.4)$$

для всевозможных фраз I из языка L . Язык, порождаемый такой формальной грамматикой, обозначим $(L_{S_1})_0$. Менее формальным, но в практическом смысле также однозначным является построение свода контекстных ограничений, сужающих $(L_{S_1})_0$ до практического языка L_{S_1} типа интересующего нас ЯСС:

$$L_{S_1} \quad ((L_{S_1})_0 \text{ с контекстными правилами})$$

Сейчас мы изложим подробности.

Полагая язык-прототип языком программирования, будем считать, что все его контекстные зависимости формулируются в терминах равенства-неравенства терминальных цепочек, подпадающих под такие понятия, как имена и идентификаторы. Также, практически не ограничивая общности, считаем, что все обозначающие эти понятия нетерминалы входят в N_1 . Но тогда соответствующие этим понятиям терминальные цепочки во фразах языка $(L_{S_1})_0$ суть цепочки (они из элементов T и L), для которых «равенство» имеет известный смысл. Рассмотрим контекстное правило K языка-прототипа P ,

применимое к цепочке α , выводимой из p_0 посредством правил из S_0 . Пусть K ссылается на равенство или неравенство между собой неких частей μ, ν, \dots этой цепочки. Эти части подпадают под понятия языка P , и для любой фразы φ языка $(L_{S_1})_0$, выведенной из α , части этой фразы, соответствующие μ, ν, \dots , имеют структуру вида $s_1 s_2 \dots s_k$, где s_i являются либо терминалами из T либо фразами из L . Тогда, по сделанному выше замечанию о сравнимости фраз, K осмысленно для φ и позволяет решить, можно ли отнести эту фразу к содержательному языку L_{S_1} . В силу предполагавшейся однозначности синтаксического разбора в P_0 , можно по определению положить, что все контекстные зависимости для L_{S_1} формируются таким и только таким образом. Содержательный синтаксис ЯСС полностью определён.

Настоящая работа посвящена разработке пригодного к практическому использованию языка семантической структуризации научных текстов следующим методом, который можно будет использовать и в других подобных ситуациях. Отправляясь от некоторой (в данном случае - описанной в [2]) «минимальной» проекции языка-прототипа, добавляем новые (контекстно-независимые по форме) правила для обслуживания расширенным языком новых функций. При этом для каждого нового понятия (нетерминала) ищем из неформальных соображений наиболее близкое к нему понятие (нетерминал) в языке-прототипе. Добавленные правила сравниваем (ориентируясь на их левые части) с теми, которые имеют место для предполагаемых понятий-прообразов, и выясняем, можно ли интерпретировать добавленные правила, как получаемые подходящим проектированием в смысле [2]. Если нет, то проверяем, нельзя ли преодолеть имеющиеся расхождения добавленных правил с «ближайшей» проекцией так, чтобы сохранилась возможность прозрачного переноса правил контекстной зависимости для понятий-прообразов на нововведенные понятия разрабатываемого языка. При новой неудаче пересматриваем соответствие добавляемых новых понятий и понятий прообразов, а в крайнем случае - корректируем добавляемые правила. В целом процедура подходит под известную в математике схему, когда доказательство сложной теоремы строится одновременно с окончательным вариантом формулировки её условия.

Оказалось, что по сравнению с осуществляемыми при проектировании операциями, в нашей практике обнаружилось ещё только два новых приёма образования правил ЯСС, которые не препятствуют переносу контекстных правил из языка Ада в язык структуризации текстов. Во-первых, это изменение порядка следования нетерминалов в правой части отдельного правила. Во-вторых, включение в ЯСС узкого класса фраз, которые на самом деле удовлетворяют правилам Ады, тогда как сами эти правила в общей форме к синтаксису разрабатываемого ЯСС не присоединяются. Технические модификации проекций, как например, переименование нетерминалов или упрощение избыточных ограничителей типа «end;», не упоминаем.

В результате создан и сейчас будет описан (в основном с позиций синтаксиса) язык, который именуем ЯСС первого уровня или, ЯСС версии 1.5.

3. Результат - синтаксис ЯСС версии 1.5

Данный язык предназначен для описания модульной структуры и межмодульных связей, которые могут быть усмотрены экспертом в текстовых материалах, размещаемых в базе данных информационной системы некоторого научного направления. С точки зрения этого языка смысл процесса размещения, далее именуемого просто размещением, состоит в передаче в базу данных системы упомянутых материалов в форме структурированных аннотаций, а затем (по мере появления возможностей) в форме реализаций - более или менее полных соответственно структурированных текстов. В реализациях, в частности, отмечаются места и виды смысловых связей с другими материалами, другими частями данного материала или с опубликованной литературой.

В начале каждого правила контекстно-свободного синтаксиса ЯСС даём его пояснение (включая важнейшие сведения о контекстных ограничениях), далее - само правило в расширенной форме Бэкуса-Наура, а в конце - соответствующее правило из формального синтаксиса языка Ада. При этом даётся ссылка на конкретный пункт стандарта языка Ада [5], из которого отбирались эти правила в процессе проектирования на вышеупомянутое множество понятий. Разумеется, в нашем изложении эти правила выглядят как «сокращения» правил из [5], поскольку в записи правил на основании расширенной формы Бэкуса-Наура содержится множество правил, имеющих стандартную форму. При проектировании такое множество, вообще говоря, сокращается.

При видимом расхождении между структурой правила ЯСС и структурой соответствующего ему правила из проекции языка Ада, тут же разъясняем, за счёт чего это противоречие преодолевается. Курсив в правилах отмечает незначимые (комментирующие) части в названиях синтаксических понятий.

В ЯСС лексика служебных терминалов (обязательно обрамляемых парами косых черт), нетерминалов (обязательно начинающихся с букв верхнего регистра, притом, что далее - только буквы нижнего регистра), а также идентификаторов ("названий") самого языка имеет особенность. В их состав могут входить пробелы, символы табуляции и концы строк, причём для идентификации важно только место вхождения, а не количество и вид таких разделителей.

Правило 1: Размещение это последовательное во времени размещение модулей. Порядок в этой последовательности, вообще говоря, существенен.

Размещение ::= { Размещаемый модуль }

Прообраз правила выбран из пункта (10.1.1.2) руководства по языку Ада [5]:

compilation ::= { compilation_unit }

Правило 2: Размещаемый модуль состоит из материала, предварённого предписанием контекста, которое, в частности определяет, какие размещаемые модули должны были быть размещены ранее данного.

Размещаемый модуль ::= Предписание контекста Материал

Соответствующее правило выбрано из (10.1.1.3) [5]:

`compilation_unit ::= context_clause library_item`

Правило 3: Под материалом понимается аннотация цельного по смыслу текстового материала или его реализация. Последняя есть некоторая версия этого текста (частичная, полная или полная комментированная).

Материал ::= Аннотация материала | Реализация материала

Из (10.1.1.4) [5]: `library_item ::= library_unit_declaration | library_unit_body`

Правило 4: Аннотация материала прежде всего вводит форму этого материала - он может быть аннотацией решения, контекста, аннотацией прототипа или же применением прототипа.

Аннотация материала ::= Аннотация решения | Аннотация контекста
| Аннотация прототипа | Создание по прототипу

Из (10.1.1.5):

`library_unit_declaration ::= subprogram_declaration | package_declaration
| generic_declaration | generic_instantiation`

Правило 5: Реализация материала размещается после его аннотации и имеет определяемую аннотацией форму, так что может быть реализацией решения или контекста.

Реализация материала ::= Реализация решения | Реализация контекста

Из (10.1.1.7): `library_unit_body ::= subprogram_body | package_body`

Правило 6: Предписание контекста может быть представлено (часто не единственным образом) последовательностью секций контекста. Порядок следования секций на смысл не влияет.

Предписание контекста ::= { Секция контекста }

Из (10.1.2.2): `context_clause ::= { context_item }`

Правило 7: Секция контекста может служить предписанием источника (источников), т.е. указывать размещённые ранее модули, от которых зависит по смыслу данный модуль. Иначе секция контекста может предписывать возможность свободного использования терминологии каких-то из только что предписанных контекстов.

Секция контекста ::= Предписание источника | Предписание терминологии

Из (10.1.2.3) [5]: `context_item ::= with_clause | use_clause`

Правило 8: Предписание источника перечисляет названия материалов, на которые можно (и по смыслу - должно) ссылаться из данного материала. Если предписанный источник имеет форму решения, то можно указывать использование его самого. Если это контекст, то можно использовать всё, что видимо в данном контексте. Если предписанный источник - прототип, то по нему можно создавать новые решения или контексты в зависимости от того, прототипом чего он является. Если предписанный источник является потомственным материалом, то, наряду с ним, предписанными считаются и все его прямые предки.

Предписание источника ::= // в контексте// Название материала
 { //и// Название материала }

Из (10.1.2.4) [5]: `with_clause ::= with library_unit_name { , library_unit_name } ;`

Правило 9: Предписание терминологии может относиться только к контекстам, видимым в месте расположения данного предписания.

Предписание терминологии ::= Предписание терминологии контекста

Из (8.4.2): `use_clause ::= use package_clause`

Правило 10: Предписание терминологии контекста перечисляет контексты и до конца текущего модуля разрешает для случаев, когда это не приводит к противоречиям, свободное использование всего того, что видимо в предписанных контекстах.

Предписание терминологии контекста ::= // в терминах// Название контекста
 { //и// Название контекста } //;

Из (8.4.3): `use_package_clause ::= use package_name { , package_name } ;`

Правило 11: Аннотация решения представляет собой оглавление, ограниченное справа зарезервированным символом.

Аннотация решения ::= Оглавление решения //;

Из (6.1.2): `subprogram_declaration ::= subprogram_specification;`

Правило 12: Для модуля материала, имеющего форму решение, оглавление вводит название и пояснение решения.

Оглавление решения ::= //результат// Вводимое название модуля материала
 Пояснение решения//;

Из (6.1.4):

`subprogram_declaration ::= procedure defining_program_unit_name formal_part;`

Соответствующее правило выбрано из (10.1.1.3) [5]:

Правило 13: Аннотация контекста представляет собой оглавление контекста.

Аннотация контекста ::= Оглавление контекста

Из (7.1.2) [5]: package_declaration ::= package_specification;

Правило 14: Для модуля материала, имеющего форму контекста, оглавление вводит его название и последовательность основных элементов содержания, которые видимы отовсюду, где видим данный контекст.

Оглавление контекста ::=

```
//контекст// Вводимое название модуля материала //это//
{ Основной элемент содержания }
//всё//
```

Из (7.1.3): package_defining_program_unit_name is

```
{ basic_declarative_item }
```

end ;

Правило 15: Для модуля материала, имеющего форму прототипа, аннотация может быть аннотацией метода решения или аннотацией схемы контекста.

Аннотация прототипа ::= Аннотация метода решения

| Аннотация схемы контекста

Из (12.1.2):

```
generic_declaration ::= generic_subprogram_declaration
| generic_package_declaration
```

Правило 16: Аннотация метода решения это оглавление решения, предваренное пояснением применения прототипа, где: объясняется, что подлежит конкретизации при конкретном применении данного метода.

Аннотация метода решения ::= //заготовленный//

Пояснение к применению прототипа

Оглавление решения

Из (12.1.3): generic_subprogram_declaration ::= **generic** [generic_formal_parameter_declaration] subprogram_declaration

Правило 17: Аннотация схемы контекста это оглавление контекста, предваренное пояснением применения прототипа, объясняющим, что подлежит конкретизации при конкретном воплощении данной схемы.

Аннотация схемы контекста ::=

//заготовленный// Пояснение к применению прототипа Оглавление контекста

Из (12.1.4): generic_package_declaration ::=

```
generic [ generic_formal_parameter_declaration ] package_declaration
```

Правило 18: Реализация решения воспроизводит оглавление решения (по аннотации), вводит (до конца реализации) собственный контекст и сопровождает текст данного модуля гипертекстовыми ссылками на фрагменты, вынесенные в собственный контекст.

```
Реализация решения ::= Оглавление решения //это//
                        Собственный контекст
                        //начало//
                        Комментированное сопровождение текста //всё//
```

Из (6.3.2) [5]: `subprogram_body ::= subprogram_specification is declarative_part`
`begin handled_sequence_of_statements end;`

Правило 19: Реализация контекста состоит в развёртывании этого (ранее аннотированного) контекста. Это означает, во-первых, что аннотированные в оглавлении контекста модули материала (из числа основных элементов содержания) получают свои реализации в собственном контексте этой реализации. Во-вторых, сопровождение текста содержит «служебную» часть текста данного модуля материала - то, что не вошло в структурированном виде в собственный контекст реализации.

```
Реализация контекста ::= //развёрнутый// //контекст//
                        Идентифицирующее название материала //это//
                        Собственный контекст
                        [//начало//
                        Последовательное комментированное изложение ]
                        //всё//
```

Из (7.2.2): `package_body ::= package_body_defining_package_identifier is declarative_part`
`[begin handled_sequence_of_statements]end;`

Правило 20: Создание по прототипу это, во-первых, именование создаваемого решения или контекста, далее - указание по имени того метода решения или схемы контекста, которые послужили прототипом, и, наконец, - пояснение использования прототипа (которое, может отсутствовать, если в пояснении применения прототипа предусмотрен стандартный - умалчиваемый вариант использования)

```
Создание по прототипу ::=
//контекст// Вводимое название модуля материала //это//
//производный// Имя схемы контекста
[Пояснение использования прототипа]//;
//результат// Вводимое название модуля материала //это//
//производный// Имя метода решения
[Пояснение использования прототипа]//;
```

Правило 33: Основное описание может определять новое понятие, вводить

Из (12.3.2) [5]: `generic_instantiation ::=`
`package defining_program_unit_name is new generic_package_name`
`[generic_actual_part];`
`| procedure defining_program_unit_name is new generic_procedure_name`
`[generic_actual_part];`

Основное описание ::=

Правило 21: Размещаемый модуль материала может представлять весь материал или его начальную часть или быть продолжением другого модуля (например, начальной части материала), который в этом случае должен иметь форму контекста и называется родительским модулем. У данного размещаемого модуля может быть сколько угодно прямых продолжений. Все они вместе со своими продолжениями (и продолжениями продолжений) называются потомками данного модуля. Родительский модуль видим в каждом из своих потомков, но не наоборот. Потомки одного поколения также не видят друг друга иначе, как с помощью предписаний контекста.

Правило 34: В данной версии только одна - обычная форма определения.

Вводимое название модуля материала ::=
`[Название родительского модуля //://] Вводимое название`

Из (6.1.7):

`defining_program_unit_name ::= [parent_unit_name .]defining_identifier`

Правило 22: Название родительского модуля ::= Название

Из (10.1.1.8): `parent_unit_name ::= name`

Правило 23: Название ::= Непосредственное название | Именованная часть

Из (4.1.2): `name ::= direct_name | selected_component`

Правило 24: Непосредственное название ::= Идентификатор

Из (4.1.3): `direct_name ::= identifier`

Правило 25: Именованная часть ::= Название части //из// Адресация

Из (4.1.3.2): `selected_component ::= prefix . selector_name`

Преодоление различия – изменение порядка «слева-направо» на порядок «справа-налево».

Правило 26: Название части ::= Идентификатор

Из (4.1.3.2): `selector_name ::= identifier`

Правило 27: Адресация ::= Название

Из (4.1.4) [5]: `prefix ::= name`

Правило 28: Пояснение решения в аннотации решения, если такое пояснение есть, представляет собой пояснение применения, разъясняющее, из чего в этом решении исходим, что получаем.

Пояснение решения ::= [Пояснение применения]

Из (6.1.12):

`parameter_profile ::= [formal_part]`

Правило 29: Пояснения применения могло бы состоять из нескольких разделов, но на данном уровне структуризации нет смысла выделять различные разделы в пояснениях к одному результату, поскольку детализация разделов не предусмотрена.

Пояснения применения ::= //:// Раздел пояснений

Из (6.1.14): `formal_part ::= (parameter_specification)`

Правило 30: На элементы текстового содержания данного модуля материала можно указывать из различных мест текста данного, а иногда и других модулей. В то же время средствами ЯСС невозможно никакое указание на элемент текста, не оформленный в качестве элемента содержания.

Собственный контекст ::= {Элемент содержания}

Из (3.11.2): `declarative_part ::= {declarative_item}`

Правило 31: Элементы содержания делятся на две группы. В одной из них те, "основные", для которых характерно то, что они связаны с именованиями, позволяющими указывать элементы текста по названиям. Во второй группе - реализации модулей, которые не определяют новых названий или доступа к ним

Элемент содержания ::= Основной элемент содержания | Реализация

Из (3.11.3): `declarative_item ::= basic_declarative_item | body`

Правило 32: Основные элементы содержания определяют новые термины для использования в последующих указаниях либо открывают потенциально прямой доступ к названиям ("терминам") из определённых контекстов

Основной элемент содержания ::=

Основное описание | Предписание терминологии

Из (3.11.4): `basic_declarative_item ::= basic_declaration | use_clause`

Правило 33: Основное описание может определять новое понятие, вводить название для порции информации, соответствующей известному понятию, именовать конкретные числовые значения, а также основное описание может быть аннотацией модуля материала или вводить модуль материала, определяемый прототипом.

Основное описание ::=

Определение | Элементы справочной информации | Именованние чисел
 | Аннотация решения | Аннотация контекста
 | Аннотация прототипа | Создание по прототипу

Из (3.1.3) [5]:

basic_declaration ::= type_declaration | object_declaration | number_declaration
 | subprogram_declaration | package_declaration
 | generic_declaration | generic_instantiation

Правило 34: В данной версии только одна - обычная форма определения.

Определение ::= Обычное определение

Из (3.2.1.2):

type_declaration ::= full_type_declaration

Правило 35: Для определения понятия необходим термин и определение.

Обычное определение ::= //определение//

Определяемый термин [//это// Формулировка определения] //;//

Из Ада (3.2.1.3): full_type_declaration ::= **type defining identifier is** type_definition;

Преодоление различия: «//определение// Определяемый идентификатор //;//»

означает

//определение// Определяемый идентификатор //это// здесь //;//

и соответствует

type defining identifier is new Here;

где Here обозначает личный тип (в смысле языка Ада), предопределённый в системе поддержки Ада-модулей, сопряжённых с модулями материалов.

Правило 36: Элементы справочной информации описывают такие количества, величины, перечни, таблицы и т.п., которые играют в текстах материалов особую роль. Этот вид основных описаний позволяет поименовать нужный информационный элемент при обязательном условии указания понятия, которое определяет характер предоставляемой этим элементом информации. В одном описании элементов справочной информации можно ввести перечень названий нескольких однотипных элементов. Можно также связать с определяемыми элементами выражение, которое будет их подразумеваемым значением.

Элементы справочной информации ::= Перечень определяемых элементов
 //:// Характер информации [//есть// Выражение]

Из (3.3.1.2) [5]:

object_declaration ::= defining_identifier_list : subtype_indication [:= expression];

Правило 37: Перечень определяемых элементов ::= Вводимое название { //и// Вводимое название }

Из (3.3.1.3):

defining_identifier_list ::= defining_identifier { , defining_identifier }

Правило 38: Характер информации указывается с помощью ранее определённого (или предопределённого) термина, причём, возможно, с указанием дополнительной специализации.

Характер информации ::= Термин [Специализация]

Из (3.3.1.2): subtype_indication ::= subtype_mark [constraint]

Правило 39: В данной версии ЯСС специализировать понятие можно только путем уточнения параметров его структуры. При этом параметрами структуры в данной версии могут обладать только предопределённые понятия (например, **библиогр** - информация об использованных литературных источниках).

Специализация ::= Специализация структуры

Из (3.2.2.5): constraint ::= composite_constraint

Правило 40: Параметры структуры, уточнение которых возможно, характеризуют регулярные перечни (списки, таблицы) или же признаки нерегулярных структур. В синтаксисе ЯСС первого уровня нет средств явного определения понятий в форме перечней или в форме с уточняемыми признаками. Но такие понятия предопределяются в ЯСС или системой поддержки ЯСС. Например, предопределённый термин **библиогр** требует уточнения диапазона номеров цитируемых источников.

Специализация структуры ::= Уточнение перечней | Уточнение признаков

Из (3.2.2.7): composite_constraint ::= index_constraint | discriminant_constraint

Правило 41: Форма уточнения регулярного перечня (массива, таблицы) в данной версии ЯСС предопределяется только в каждом конкретно случае вместе с предопределяемым термином. Естественно, будет требоваться указывать диапазоны индексов, например, **библиогр (1..12)**.

Уточнение перечней ::= //((//Чёткий диапазон { //и// Чёткий диапазон } //))//

Правило 47: Параметры справочной информации указываются в форме значений размеров и элементов перечней, таблиц и т.п., а указания на использование модулей-результатов раскрывают систему смысловых зависимостей в системе модулей размещённых материалов.

Прямое указание ::=

Указание значения | Указание использования результатов

Из (5.1.4) [5]: `simple_statement ::= assignment_statement | procedure_call_statement`

Правило 48: Перечни, элементы таблиц и т.п. могут получать, как числовые, так и описываемые словами значения там, где они видимы как элементы справочной информации

Указание значения ::=

Название элемента справочной информации //есть// Выражение //;/

Из Ада (5.2.2): `assignment_statement ::= variable_name := expression;`

Правило 49: Название результата, с которого начинается конструкция указание использования результата, имеет форму, зависящую от места, где эта конструкция находится. Если аннотация используемого результата видна с этого места прямо (находится в том же модуле или корректно подпадает под предписание терминологии объемлющего аннотацию контекста), то достаточно использовать непосредственное название результата, т.е. его идентифицирующее название, определённое в аннотации. Если же видимость есть, но не прямая, то указывать использование результата можно, но его название должно иметь форму составного имени. Оно начинается с непосредственного название результата и далее через разделители //из// - названия контекстов, объемлющих аннотацию данного результата, начиная с непосредственно объемлющего и заканчивая наиболее внешним из тех, которые видимы в месте использования. Если этот наиболее внешний контекст является размещаемым модулем, но его название в свою очередь может включать названия родительских модулей (через разделитель //:/).

Указание использования результата ::=

Адресация результата [Пояснение использования] //;/

Из (6.4.2): `procedure_call_statement ::= procedure_name;`

`| procedure_prefix actual_parameter_part;`

Правило 50: Если пояснение решения в оглавлении решения было не пустым, а имело пояснение применения, то указание использования данного результата должно иметь соответствующее пояснение использования.

Пояснения использования ::= //(// Соответствующее пояснение //)/

Из (6.4.4) [5]: `actual_parameter_part ::= (parameter_association)`

Правило 51: Следующие нетерминалы замещаются текстом на естественном языке в соответствии со смыслом проводимой структуризации соответствующего модуля материала:

Вводимое название, Выражение, Идентификатор, Конкретизация признака, Пояснение использования прототипа, Пояснение к применению прототипа, Соответствующее пояснение, Раздел пояснений, Термин.

4. Заключение

Исследован вопрос о заимствовании из языка-прототипа правил контекстной зависимости при разработке синтаксиса языков разметки текстов на базе известного языка. В частности указаны условия корректности дополнения проекции контекстно-свободного синтаксиса соответствующей «проекцией» контекстных правил языка-прототипа.

Предложен метод для построения полезных в приложениях расширений «минимального» языка разметки, непосредственно определённого проекцией в понимаемом выше смысле.

Реализовано построение полного синтаксиса языка семантической структуризации (ЯСС) в версии 1.5, которая позволяет обслуживать все стадии процесса размещения материалов в базе данных информационной системы научного направления.

Использование в качестве языка-прототипа известного языка программирования Ада обеспечивает возможность практического внедрения нового языка ЯСС 1.5 путём подключения стандартных информационных технологий, связанных с языком Ада.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мищенко В.О. Развивающаяся информационная система научного направления с выходом программного обеспечения // Інформаційна інфраструктура вищих закладів освіти / Зб.наук. праць. Том 2. - Херсон: Херсонський державний педагогічний ун-т, 2000. - С. 208-216.
2. Мищенко В.О. Семантическая структуризация текстовых данных в базе данных, поддерживающей распределенную разработку программного обеспечения // Вестник ХГТУ. - 2002, № 1 (14). - С. 304-307.
3. Кауфман В.Ш. Языки программирования. Концепции и принципы. - М.: Радио и связь, 1993. - 432 с.
4. Ахо А., Ульман Дж. Теория синтаксического анализа, перевода и компиляции. Том 1: Синтаксический анализ. - М.: Мир, 1978. - 497 с.
5. Taft S. Tucker, Duff Robert A.(eds) Ada Reference Manual: Language and Standard Libraries, International Standard ISO/IEC 8652:1995(E).-Lecture Notes in Computer Science.- vol.1246.- Springer-Verlag, 1997, ISBN 3-540-63144-5.

Реализации математической модели тепловых процессов в рентгеновских трубках с вращающимся анодом с целью их защиты от перегрузки

С. Н. Рева, Н. Н. Калиниченко, В. Н. Лященко

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Украина

There is a method of X-Ray tube's anode temperature control that is considered. This method is based on heat processes' numeral modeling. Here's algorithm of program realization of simulator for octet single-chip micro controllers that is suggested. Also results of method's application in supply devices of X-Ray systems are described. It could be useful in development of executive systems for medical X-Ray equipment.

Государственными научно-техническими программами предусмотрено развитие приоритетных направлений в науке и технике, одним из которых является разработка новых технологий и средств диагностики и лечения наиболее распространенных заболеваний [1].

Источники рентгеновского излучения сегодня широко применяются в медицине в составе рентгенодиагностического и терапевтического оборудования. В основе работы подавляющего большинства их лежит принцип генерации рентгеновского излучения при бомбардировке вольфрамового анода потоком ускоренных электронов. Потенциал ускоряющего электростатического поля в медицинских рентгеновских трубках обычно изменяется в диапазоне от 40 до 150 кВ, а величина анодного тока может составлять десятки и сотни миллиампер. Коэффициент полезного действия таких источников крайне низок, и подавляющая часть энергии, подводимой к рентгеновским трубкам, выделяется в виде тепла. Мощность, выделяемая на поверхности анода в процессе работы рентгеновской трубки, составляет десятки киловатт и концентрируется на площади 1..2 мм². Высокая плотность тепловой энергии может привести к разрушению поверхности анода, поэтому в большинстве рентгеновских трубок применяется вращающийся анод, выполненный в виде массивного вольфрамового диска. При работе трубки фокусное пятно электронного луча скользит по кольцевой траектории, в результате чего площадь контакта луча с поверхностью анода увеличивается в сотни раз и, соответственно, уменьшается плотность тепловой энергии, выделяемой на поверхности [2].

В медицинской диагностической аппаратуре рентгеновские трубки как правило работают в кратковременно повторяющемся режиме. Время экспозиции одного рентгеновского снимка может составлять от 0.05 с до 2..3 с, после чего следует перерыв длительностью от 30 с до нескольких минут. Количество тепловой энергии, выделяемой на аноде, например, в течение одного флюорографического снимка, составляет около 10 кДж. В промежутках между

снимками тепло, выделенное на поверхности, распределяется по всему объему вольфрамового анода, но из-за особенностей конструкции не может быть отведено за пределы рентгеновской трубки. Происходит процесс накопления тепла и повышения температуры анода. Это может привести к перегреву отдельных конструктивных элементов и разрушению рентгеновской трубки. Чтобы избежать перегрева необходим постоянный контроль тепловыделения в трубке — контроль тепловой нагрузки.

Контроль температуры анода является весьма проблематичным из-за особенностей конструкции трубки: вольфрамовый диск анода вращается внутри вакуумного стеклянного баллона, а следовательно, какие либо контактные методы контроля исключены. Возможно применение пирометрических измерений, но оно осложнено наличием разогретого до высокой температуры катода, который расположен в непосредственной близости от объекта измерений. Кроме того пирометрический метод контроля весьма дорог в реализации и на практике в серийной аппаратуре не применяется.

В большинстве рентгеновских аппаратов контроль теплового режима трубки осуществляется методом моделирования, чаще всего с помощью электронной схемы. Суть работы модели состоит в том, что в зависимости от параметров предыдущего снимка генерируется сигнал переменной длительности запрета включения высокого напряжения. В процессе снимка происходит накопление электрического заряда пропорционально мощности и длительности снимка, а затем имитируется процесс остывания — разряд конденсатора [3]. При снижении напряжения на конденсаторе ниже контрольного уровня разрешается выполнение очередного снимка. Такая модель работает весьма приближенно и не отличается высокой надежностью.

В паспорте рентгеновской трубки строго регламентируется максимальное время экспозиции в зависимости от режима мощности, а также длительность перерывов между снимками, необходимых для остывания анода. Обычно эти зависимости представлены в виде таблиц допустимых режимов эксплуатации. Для примера приведем тепловые характеристики (вернее, эксплуатационные характеристики, определяемые температурным фактором) рентгеновской трубки 20-50БД22-150, работающей в режиме малого фокусного пятна при однофазной схеме питания.

— температура окружающей среды;

Таблица 1

Длительность нагрузки, с	Длительность перерыва, мин	Напряжение трубки, кВ											
		40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
		Ток трубки, мА											
0,01	0,5	250	250	250	250	250	220	200	180	160	150	140	130
0,02	0,5	250	250	250	250	250	220	200	180	160	150	140	130
0,04	0,5	250	250	250	250	240	210	190	170	160	150	140	130
0,06	0,5	250	250	250	250	240	210	190	170	160	150	140	130
0,08	0,5	250	250	250	250	230	200	180	170	150	140	130	120
0,10	0,5	250	250	250	250	230	200	180	170	150	140	130	120
0,12	0,5	250	250	250	250	230	200	180	170	150	140	130	120
0,16	1,0	250	250	250	250	220	200	180	160	150	130	130	120
0,20	1,0	250	250	250	250	220	200	180	160	150	130	130	120
0,25	1,0	250	250	250	240	210	190	170	150	140	130	120	110
0,32	1,5	250	250	250	240	210	190	170	150	140	130	120	110
0,40	1,5	250	250	250	230	200	180	160	150	130	120	120	110
0,50	2,0	250	250	250	230	200	180	160	150	130	120	120	110
0,60	2,0	250	250	250	220	200	170	160	140	130	120	110	100
0,80	2,5	250	250	240	210	190	160	150	130	120	110	110	100
1,00	2,5	250	250	230	200	180	160	140	130	120	110	100	95
1,20	3,0	250	250	220	190	170	150	130	120	110	105	95	90
1,50	3,5	250	250	210	180	160	140	130	110	105	100	90	85
2,00	4,0	250	240	200	170	150	130	120	110	100	95	85	80
2,50	4,5	250	230	190	160	140	120	110	100	95	85	80	75
3,00	5,0	250	210	180	150	130	120	110	95	90	80	75	70
4,00	5,0	250	200	160	140	120	110	100	90	85	75	70	65
5,00	5,5	230	180	150	130	110	100	90	85	75	70	65	60
10,00	6,0	190	150	130	110	100	85	80	70	65	60	55	50

Современные системы управления медицинскими рентгеновскими аппаратами базируются на основе микропроцессорных систем с использованием однокристалльных микроконтроллеров. Поэтому процесс нагрева рентгеновской трубки более целесообразно моделировать численным методом. Как правило, для управления рентгеновскими аппаратами, как и другими экспериментальными и промышленными установками, применяются аппаратно ориентированные процессоры, не приспособленные для выполнения объемных математических вычислений. Следовательно, создаваемая модель должна быть по возможности простой и строиться на основе двоичных целочисленных алгебраических операций.

Для отслеживания температуры анода построена математическая модель тепловых процессов, протекающих в термодинамической системе: анод трубки — окружающая среда.

В основу расчета положено предположение, что в момент включения рентгеновского аппарата температура анода равна температуре окружающей среды ($\sim 300^\circ\text{K}$). В процессе работы температура анода повышается при каждом выполненном снимке, так как именно на аноде выделяется основная часть тепловой мощности. Остывание же анода происходит в основном за счет теплового излучения в окружающее пространство, поскольку другие механизмы теплопередачи практически не работают: конвекция в вакуумном пространстве отсутствует, а тепловое сопротивление очень велико из-за малой площади теплового контакта анода с корпусом трубки.

Энергия анода рентгеновской трубки зависит от температуры анода и может быть представлена в виде:

$$E_a = mcT_a, \quad (1)$$

где E_a — энергия анода; $E_a = mcT_a$

m — масса анода;

c — теплоемкость вольфрама;

T_a — температура анода.

Математическая модель термодинамического процесса является итерационной, и энергия анода в текущий момент времени может быть выражена с учетом значения энергии на предыдущем шаге итерации и значений полученной и рассеянной энергии за время между двумя итерациями.

С учетом описанных выше допущений уравнение термодинамического баланса энергий запишем в виде

$$E_{an} = E_{a(n-1)} - E_p + E_{-}, \quad (2)$$

где E_{an} — энергия анода в текущий момент времени;

$E_{a(n-1)}$ — энергия анода на предыдущем шаге итерации;

E_p — энергия, рассеянная за время одной итерации;

E_{-} — энергия, полученная анодом при выполнении снимка.

Мощность излучения в окружающее пространство в соответствии с законом Стефана-Больцмана [4] запишем в виде

$$P_U = \sigma \varepsilon S (T_a^4 - T_0^4), \quad (3)$$

где P_U — мощность излучения энергии;

σ — постоянная Больцмана;

ε — коэффициент черноты анода;

S — площадь излучения анода;

T_a — температура анода;

T_0 — температура окружающей среды;

Энергию, отдаваемую в пространство за короткий интервал времени (интервал, внутри которого можно принять $T_a = const$), запишем в виде

$$E_p = P_U \tau_p = \tau_p \sigma \varepsilon S (T_a^4 - T_0^4) \quad (4)$$

где τ_p — время рассеяния энергии анода.

Выбрав время одной итерации $\tau_p = 1$ с учетом (1), запишем выражение (4) в виде

$$E_p = P_U \tau_p = P_U \cdot 1 = \sigma \varepsilon S (T_a^4 - T_0^4),$$

Для однофазной схемы питания рентгеновской трубки при синусоидальной форме высокого напряжения во время выполнения снимка анод рентгеновской трубки получает энергию

$$E_{-} = 0,707 \cdot U_v I_a \tau_{-}, \quad (6)$$

где U_v — амплитудное значение высокого напряжения;

I_a — действующее значение тока анода.

τ_{-} — время экспозиции.

Подставим выражения (5) и (6) в основное уравнение термодинамического баланса системы (2).

$$E_{an} = E_{a(n-1)} - \sigma \varepsilon S \left[\left(\frac{E_a}{mc} \right)^4 - T_0^4 \right] + 0,707 U_v I_a \tau_{-}, \quad (7)$$

где E_{an} — значение энергии анода на текущем шаге итерации;

$E_{a(n-1)}$ — значение энергии анода на предыдущем шаге итерации.

Таким образом выражение (7) является расчетным итерационным уравнением термодинамического состояния системы. Другие механизмы потери энергии в данной модели не учитываются в силу их малости.

Для проведения всех последующих расчетов будут использованы приведенные ниже числовые значения:

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ (Вт/(м²·°К⁴)) — постоянная Больцмана;

$\varepsilon = 0,2$ — коэффициент черноты анода;

$S = 0,0157$ м² — площадь излучения анода;

$m = 0,665$ кг — масса анода;

$c = 134$ (Дж/(кг·°К)) — теплоемкость вольфрама;

$T_0 = 300$ °К — температура окружающей среды;

$T_{max} = 1300$ °К — максимально возможная температура анода;

$T_g = 700$ °К — максимально допустимая рабочая температура анода.

Приняв значение температуры анода $T_a = T_{max} = 1300$ °К выполним расчет значения энергии в соответствии с выражением (1).

$$E_a = mcT_a = 0,665[\text{кг}] \cdot 134[\text{Дж} / (\text{кг} \cdot \text{°К})] \cdot 1300[\text{°К}] = 115843[\text{Дж}], \quad (8)$$

Для упрощения расчетов при переходе к двоичным математическим операциям введем понятие условных единиц энергии. Примем максимально возможное значение энергии анода за 250 условных единиц (далее по тексту — у. е.), таким образом:

$$E_{a\max} [\text{y.e.}] = \frac{E_a [\text{Дж}]}{463 [\text{Дж}]} = \frac{115843}{463} \approx 250, \quad (9)$$

при этом текущее значение энергии может быть представлено в виде однобайтного двоичного числа.

Используя уравнение (7) итерационным методом выполнен расчет зависимости температуры анода от времени остывания при условии, что начальная температура анода равна 1300 °К, а в процессе остывания снимки не выполняются и, следовательно, энергия в систему не поступает ($E_{\text{сн}} = 0$). В приложении 1 приведены результаты расчета, соответствующие изменению энергии с шагом 463 Дж (1 у.е.). Последний столбец таблицы содержит длительности интервалов времени, в течении которых происходит излучение 1 у.е. энергии.

Для ограничения возможности выполнения очередного снимка необходимо задать критическую температуру, превышение которой приводит к запрету включения высокого напряжения. Критическая температура определяется как максимальная температура анода, при которой любой режим экспозиции, допустимый паспортом рентгеновской трубки, не приведет к превышению максимально допустимой температуры. Для данного типа трубки она выбрана равной 700 °К, и достигается при критическом уровне энергии 135 у.е.

Для реализации математической тепловой модели с минимальным использованием расчетных ресурсов процессора построен следующий алгоритм.

В микроконтроллере активизируется режим аппаратных прерываний по таймеру с периодом 1 секунда, который необходим для отсчета интервалов времени. Алгоритм обработки прерываний показан на рис.1.

Каждый раз после выполнения снимка в главном цикле программы устанавливается флаг выполнения снимка F_{ex} . При входе в программу обработки прерывания по условию установки флага F_{ex} активизируется процедура расчета приращения энергии анода в условных единицах путем перемножения мощности экспозиции P_{ex} на время экспозиции T_{ex} с последующим делением на масштабный коэффициент 463. Значение переменной E_a , которая отображает текущее значение энергии анода, увеличивается на соответствующее количество единиц, а также устанавливается счетчик таймаута T_2 равным 30 с. При этом устанавливается флаг запрета выполнения очередного снимка V_{ex} и сбрасывается флаг F_{ex} (правая ветвь алгоритма).

Счетчик таймаута T_2 необходим для отсчета паузы длительностью 30 с между двумя очередными снимками. За время этой паузы происходит процесс остывания поверхности анода и распределения тепла по всему объему анода. Декремент счетчика T_2 выполняется при каждом очередном входе в программу обработки прерываний до полного его обнуления. Завершение тридцатисекундной паузы является одним из обязательных условий сброса флага запрета снимка V_{ex} и проверяется в двух других ветвях алгоритма.

Вторым условием разрешения очередного снимка является уменьшение текущего значения энергии анода E_a ниже критического уровня $E_{\text{кр}}$. Декремент переменной E_a производится по условию окончания очередного таймаута T_1 . При этом каждый раз выполняется перезапуск таймаута, а значение счетчика

трубки в соответствии с предложенным алгоритмом. Действия с плавающей запятой при этом не используются.

Данные последнего столбца из таблицы приложения 1 можно последовательно просуммировать, перемещаясь от критической температуры вверх. При этом для каждого значения энергии анода будет сформирована длительность интервала времени, который необходим для остывания до критической температуры. На рис. 2 показана в виде графика зависимость этого времени от величины приращения энергии анода.

На этом же рисунке в аналогичном масштабе изображена гистограмма, отображающая зависимость длительности перерывов между снимками, выполненными при критической температуре, от энергии предыдущего снимка в соответствии с паспортом на рентгеновскую трубку.

Из рисунка понятно, что предлагаемый метод числового моделирования обеспечивает расчет длительностей пауз достаточно близких к паспортным требованиям для данного типа трубки.

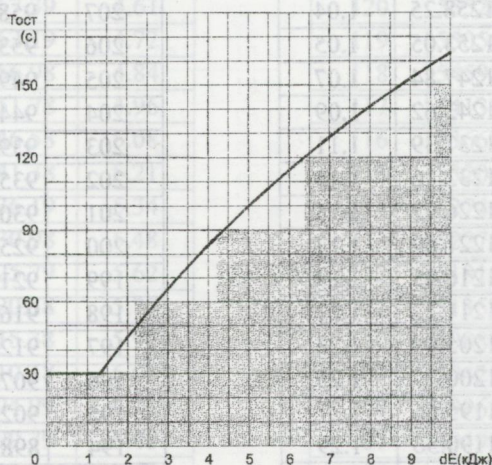


Рис. 2. Зависимость длительности перерывов между снимками от энергии выполненного снимка

Индикация теплового состояния осуществляется с помощью линейного 24-сегментного светодиодного индикатора, который имеет вид столбикового термометра. Верхняя часть светодиодов, соответствующих значениям температуры выше критической, имеет красный цвет свечения, остальные — зеленый. Свечение хотя бы одного красного сегмента свидетельствует о невозможности выполнения очередного снимка.

Описанный выше алгоритм используется для контроля теплового состояния трубки в пультах управления цифровыми и пленочными рентгеновскими флюорографическими аппаратами типа «ИНДИАРС» [5] и «ИНДИАРС-П» [6], выпускаемых производственным предприятием «Квант» (г. Харьков), а также «ДИАРС-М» (завод «Мосрентген», г. Москва). Опыт эксплуатации более 60 флюорографов в течение четырех лет показал высокую степень надежности защиты рентгеновских трубок от перегрева.

Аналогичные численные модели могут быть построены для трехфазных низкочастотных, а также высокочастотных схем питания рентгеновских трубок.

Приложение 1

Еа/463 (у.е.)	Еа (Дж)	Та (К)	τ (с)					
249	115379.97	1294.85	0.91		215	99566.83	1117.37	1.67
248	114914.45	1289.63	0.94		214	99101.67	1112.15	1.70
247	114446.71	1284.38	0.96		213	98637.14	1106.94	1.73
246	113981.76	1279.16	0.97		212	98173.42	1101.73	1.76
245	113514.94	1273.92	0.99		211	97708.10	1096.51	1.80
244	113051.10	1268.72	1.00		210	97243.99	1091.30	1.83
243	112585.73	1263.49	1.02		209	96778.77	1086.08	1.87
242	112119.04	1258.25	1.04		208	96315.12	1080.88	1.90
241	111655.65	1253.05	1.05		207	95850.80	1075.67	1.94
240	111191.24	1247.84	1.07		206	95386.06	1070.45	1.98
239	110726.01	1242.62	1.09		205	94921.14	1065.23	2.02
238	110260.19	1237.39	1.11		204	94456.27	1060.02	2.06
237	109793.94	1232.16	1.13		203	93991.67	1054.80	2.10
236	109327.47	1226.92	1.15		202	93527.54	1049.59	2.14
235	108860.94	1221.69	1.17		201	93064.09	1044.39	2.18
234	108394.53	1216.45	1.19		200	92599.43	1039.18	2.23
233	107928.41	1211.22	1.21		199	92135.90	1033.97	2.27
232	107462.72	1205.99	1.23		198	91671.66	1028.76	2.32
231	106997.62	1200.77	1.25		197	91207.00	1023.55	2.37
230	106533.24	1195.56	1.27		196	90742.19	1018.33	2.42
229	106069.74	1190.36	1.29		195	90277.46	1013.12	2.47
228	105603.72	1185.13	1.32		194	89813.06	1007.91	2.52
227	105138.95	1179.91	1.34		193	89349.21	1002.70	2.57
226	104675.53	1174.71	1.36		192	88886.13	997.50	2.62
225	104210.26	1169.49	1.39		191	88422.30	992.30	2.68
224	103746.66	1164.29	1.41		190	87958.01	987.09	2.74
223	103281.64	1159.07	1.44		189	87493.56	981.87	2.80
222	102818.60	1153.87	1.46		188	87029.21	976.66	2.86
221	102354.52	1148.66	1.49		187	86565.22	971.45	2.92
220	101889.66	1143.44	1.52		186	86101.82	966.25	2.98
219	101424.24	1138.22	1.55		185	85637.74	961.05	3.05
218	100958.49	1132.99	1.58		184	85173.29	955.83	3.12
217	100495.48	1127.80	1.60		183	84710.20	950.64	3.18
216	100032.45	1122.60	1.63		182	84245.85	945.43	3.26
					181	83781.97	940.22	3.33

Еа/463 (у.е.)	Еа (Дж)	Тa (К)	τ (с)					
180	83318.81	935.02	3.40		135	62467.25	701.01	10.97
179	82855.30	929.82	3.48		134	62004.24	695.82	11.31
178	82391.74	924.62	3.56		133	61541.05	690.62	11.67
177	81928.42	919.42	3.64		132	61077.86	685.42	12.04
176	81464.40	914.21	3.73		131	60614.50	680.22	12.43
175	81001.21	909.01	3.81		130	60151.18	675.02	12.83
174	80537.93	903.81	3.90		129	59688.15	669.82	13.24
173	80074.88	898.62	3.99		128	59224.94	664.63	13.68
172	79611.21	893.41	4.09		127	58761.87	659.43	14.13
171	79147.29	888.20	4.19		126	58298.57	654.23	14.61
170	78683.44	883.00	4.29		125	57835.41	649.03	15.10
169	78219.99	877.80	4.39		124	57372.40	643.84	15.61
168	77756.21	872.59	4.50		123	56909.33	638.64	16.15
167	77292.45	867.39	4.61		122	56446.32	633.44	16.71
166	76829.04	862.19	4.72		120	55520.03	623.05	17.92
165	76365.35	856.98	4.84		119	55056.90	617.85	18.56
164	75901.73	851.78	4.96		118	54593.84	612.65	19.23
163	75438.53	846.58	5.08		117	54130.66	607.46	19.94
162	74975.19	841.38	5.21		116	53667.47	602.26	20.68
161	74512.07	836.19	5.34		115	53204.38	597.06	21.45
160	74048.67	830.98	5.48		114	52741.34	591.87	22.26
159	73585.39	825.79	5.62		113	52278.17	586.67	23.12
158	73121.78	820.58	5.77		112	51815.12	581.47	24.01
157	72658.24	815.38	5.92		111	51352.10	576.27	24.95
156	72195.15	810.18	6.07		110	50889.09	571.08	25.94
155	71732.11	804.99	6.23		109	50425.95	565.88	26.99
154	71268.81	799.79	6.40		108	49962.95	560.69	28.08
153	70805.65	794.59	6.57		107	49499.90	555.49	29.24
152	70342.35	789.39	6.75		106	49036.86	550.29	30.46
151	69879.31	784.19	6.93		105	48573.80	545.10	31.75
150	69416.29	779.00	7.12		104	48110.77	539.90	33.11
149	68953.08	773.80	7.32		103	47647.72	534.70	34.55
148	68489.51	768.60	7.53		102	47184.60	529.51	36.08
147	68026.03	763.40	7.74		101	46721.53	524.31	37.69
146	67562.51	758.19	7.96		100	46258.47	519.11	39.40
145	67099.38	753.00	8.18		99	45795.38	513.92	41.22
144	66635.98	747.80	8.42		98	45332.29	508.72	43.15
143	66172.79	742.60	8.66		97	44869.24	503.52	45.20
142	65709.74	737.40	8.91		96	44406.15	498.33	47.39
141	65246.29	732.20	9.18		95	43943.07	493.13	49.72
140	64782.96	727.00	9.45		94	43479.99	487.93	52.21
139	64319.74	721.80	9.73		93	43016.92	482.74	54.87
138	63856.68	716.61	10.02		92	42553.91	477.54	57.71
137	63393.37	711.41	10.33		91	42090.86	472.34	60.77
136	62930.34	706.21	10.64		90	41627.81	467.15	64.05
					89	41164.74	461.95	67.58

Еа/463 (у.е.)	Еа (Дж)	Та (К)	τ (с)
88	40701.69	456.75	71.38
87	40238.68	451.56	75.48
86	39775.67	446.36	79.92
85	39312.64	441.17	84.74
84	38849.63	435.97	89.97
83	38386.60	430.77	95.68
82	37923.57	425.58	101.91
81	37460.55	420.38	108.74
80	36997.53	415.18	116.25
79	36534.52	409.99	124.53
78	36071.50	404.79	133.71
77	35608.48	399.60	143.92
76	35145.46	394.40	155.32
75	34682.46	389.20	168.13
74	34219.44	384.01	182.61
73	33756.43	378.81	199.07
72	33293.42	373.62	217.93
71	32830.41	368.42	239.72
70	32367.40	363.22	265.14
69	31904.40	358.03	295.13
68	31441.38	352.83	331.00
67	30978.38	347.64	374.56
66	30515.38	342.44	428.51
65	30052.37	337.25	496.95
64	29589.36	332.05	586.43
63	29126.36	326.85	708.20
62	28663.36	321.66	883.29
61	28200.36	316.46	1156
60	27737.36	311.27	1640
59	27274.36	306.07	2745
58	26811.36	300.87	8833

ЛИТЕРАТУРА

1. Постановление Кабинета министров Украины от 24 декабря 2001г. №171 Об утверждении перечня государственных научно-технических программ по приоритетным направлениям развития науки и техники на 2002—2006 годы.
2. Михайлов А.Н. Средства и методы современной рентгенографии, — Мн.: Бел. наука, 2000. — 242 с.
3. Клюев В. В. Рентгенотехника, в 2-х кн., Книга.1 — М.: Машиностроение, 1992.— 480 с.
4. Дубровский И.М., Егоров Б.В., Рябошапка К.П. Справочник по физике, — К.: Наукова думка, 1986. — 558 с.

- 5. Свідотство про державну реєстрацію № 6051105-350 от 11.01.2001. Флюорограф з цифровою обробкою зображення «Індіарс», ТУ УЗ-25461966.003-2000.
- 6. Свідотство про державну реєстрацію № 605571/2001 от 19.12.2001. Апарат рентгено-флюорографічний перевозний «Індіарс-П», ТУ У 33.1-25461966-004-2001.

Решение одной осесимметричной задачи
 электростатика для сферы с коническим отверстием
 и конуса с шаровым закруглением

В.А. Ратушняк, О.В. Стенушевско

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина
 The solution of the axisymmetrical problem of electrostatics was considered. Potential of ideal conductivity spherical segment is investigated in presence of infinite grounding cone with spherical rounding found. We used the following methods: the method of separation of variables, the method of residues in special points of analytical functions, the method of inversion of part of an operator corresponding analogical problem for the sphere without presence of the cone. The auxiliary integral Legendre's equation of the second kind is obtained. The space distribution of potential and capacity of the system are analyzed. The comparison with known results and limit cases of the solving problem is presented. The effectiveness of applied algorithm is confirmed.

1. Введение

Задачи электростатического характера являются актуальными по многим причинам. Известны многочисленные применения конических и сферических структур в инженерии, в частности в антенной и волноводной технике и электродной оптике, а также в радиотехнике. Методы решения задач электростатического характера являются наиболее эффективными в тех случаях, когда требуется анализ поведения электродов, имеющих форму конуса с шаровым закруглением. В связи с этим возникает необходимость в решении и анализе подобных задач (таких задач) в электростатике. Целью работы является строгое решение задачи электростатического характера с помощью метода разделения переменных и метода вычетов в специальных точках. Для этого применяются известные аналитические методы подбора матрицы и интегральной операции [1]-[10]. Особое внимание уделяется построению уравнения. Приводятся тестовые примеры. Отметим, что рассмотренная задача не сводится к известным решениям [2, 3, 8, 12].

Так как поверхности, в том числе коническая и подвешенная координатными, то применим метод разделения переменных в сферической системе координат. Вторичные потенциалы $U^{(1)}$ и $U^{(2)}$ помещены в центр конуса с шаровым отверстием и в центр конуса с шаровым отверстием.

2. Постановка задачи

Поместим в центр конуса с шаровым отверстием и в центр конуса с шаровым отверстием заряды Q_1 и Q_2 (см. рис.).