

ISSN (Print) 2616-6836
ISSN (Online) 2663-1296

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің

ХАБАРШЫСЫ
BULLETIN **ВЕСТНИК**
of L.N. Gumilyov Евразийского национального
Eurasian National University университета имени Л.Н. Гумилева

ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ сериясы

PHYSICS. ASTRONOMY Series

Серия ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ

№ 4(141)/2022

1995 жылдан бастап шығады

Founded in 1995

Издается с 1995 года

Жылына 4 рет шығады

Published 4 times a year

Выходит 4 раза в год

Астана, 2022

Astana, 2022

Астана, 2022

Бас редакторы **Жумадилов К.Ш.**
PhD, проф., Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Бас редактордың орынбасары **Абуова Ф.У.**
PhD, доц., Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан

Редакция алқасы

Ержанов Қ.Қ.	PhD, Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Кайнарбай А.Ж.	ф.-м.ғ.к., Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Козловский А.Л.	PhD, Ядролық физика институты, Астана, Қазақстан
Морзабаев А.К.	ф.-м.ғ.к., Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Салиходжа Ж.М.	ф.-м.ғ.к., Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Усеинов А.Б.	PhD, Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Джансейтов Д.М.	PhD, Ядролық физика институты, Астана, Қазақстан
Шункеев К.Ш.	ф.-м.ғ.д., Қ.Жұбанов ат. АӨУ, Ақтөбе, Қазақстан
Исадықов А.Н.	PhD, Біріккен ядролық зерттеулер институты, Дубна, Ресей
Шарафуллин И.Ф.	ф.-м.ғ.д., Башқұрт мемлекеттік университеті, Уфа, Ресей
Сакута С.Б.	ф.-м.ғ.д., Ұлттық зерттеу институты Курчатов институты, Мәскеу, Ресей
Лущик А.Ч.	ф.-м.ғ.д., Тарту университеті, Тарту, Эстония
Попов А.И.	ф.-м.ғ.д., Латвия университеті, Рига, Латвия
Хоши М.	PhD, Хиросима Университеті, Хиросима, Жапония
Тойода Ш.	PhD, Окаяма Ғылым Университеті, Окаяма, Жапония
Ертурк С.	PhD, Нийде Университеті, Нийде, Түркия
Килин Д.	PhD, Солтүстік Дакота мемлекеттік университеті, Фарго, АҚШ
Юлун Хан	PhD, Солтүстік Дакота мемлекеттік университеті, Фарго, АҚШ

Редакцияның мекен жайы: 010008, Қазақстан, Астана қ., Сәтбаев к-сі, 2
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, 402 б.
Тел: +7 (7172) 709-500 (ішкі 31-315). E-mail: vest_phys@enu.kz

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Хабаршысы
ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ сериясы

Меншіктенуші: КеАҚ "Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті"

Мерзімділігі: жылына 4 рет

Қазақстан Республикасының Ақпарат және коммуникациялар министрлігімен тіркелген

02.02.2021ж. № KZ66VPY00031918 қайта есепке қою туралы куәлігі

Типографияның мекенжайы: 010008, Қазақстан, Астана қ., Қажымұқан к-сі 13/1

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті

Тел: +7 (7172)709-500 (ішкі 31-315). Сайт: <http://bulphysast.enu.kz>

Editor-in-Chief **K. Zhumadilov**
PhD, Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Deputy Editor-in-Chief **F. Abuova**
PhD, Ass. Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Editorial board

K. Yerzhanov	PhD, L.N. Gumilyov ENU, Astana, Kazakhstan
A. Qainarbai	Candidate of Phys.-Math. Sciences, L.N. Gumilyov ENU, Astana, Kazakhstan
A. Kozlovskiy	PhD, Institute of Nuclear Physics», Astana, Kazakhstan
A. Morzabaev	Candidate of Phys.-Math. Sciences, L.N. Gumilyov ENU, Astana, Kazakhstan
Zh. Salikhodzha	Candidate of Phys.-Math. Sciences, L.N. Gumilyov ENU, Astana, Kazakhstan
A. Useinov	PhD, L.N. Gumilyov ENU, Astana, Kazakhstan
D. Dzhanseytov	PhD, Institute of Nuclear Physics», Astana, Kazakhstan
K. Shunkeyev	Doctor of Phys.-Math. Sciences, K. ZHubanov University, Aktobe, Kazakhstan
A. Isadykov	PhD, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia
I. Sharafullin	Doctor of Phys.-Math. Sciences, Bashkir State University, Ufa, Russia
S. Sakuta	Doctor of Phys.-Math. Sciences, Kurchatov Institute, Moscow, Russia
A. Lushchik	Doctor of Phys.-Math. Sciences, University of Tartu, Tartu, Estonia
A. Popov	Doctor of Phys.-Math. Sciences., University of Latvia, Riga, Latvia
M. Hoshi	PhD, Hiroshima University, Hiroshima, Japan
Sh. Toyoda	PhD, Okayama University of Science, Okayama, Japan
S. Yerturk	PhD, Niğde Ömer Halisdemir University, Niğde, Türkiye
Dmitri Kilin	PhD, North Dakota State University, Fargo, USA
Yulun Han	PhD, North Dakota State University, Fargo, USA

Editorial address: 2, Satpayev str., of. 402
L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, 010008
Tel.: +7 (7172) 709-500 (ext. 31-315), E-mail: vest_phys@enu.kz

Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University
PHYSICS. ASTRONOMY Series

Owner: Non-profit joint-stock company «L.N. Gumilyov Eurasian National University»

Periodicity: 4 times a year

Registered by the Ministry of Information and Communication of the Republic of Kazakhstan

Rediscount certificate № KZ66VPY00031918 from 02.02.2021

Address of Printing Office: 13/1 Kazhimukan str., Astana, Kazakhstan 010008

L.N. Gumilyov Eurasian National University

Tel: +7 (7172) 709-500 (ext.31-315). Website: <http://bulphysast.enu.kz>

Главный редактор **Жумадилов К.Ш.**
PhD, проф., ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Зам. главного редактора **Абуова Ф.У.**
PhD, доцент, ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Редакционная коллегия

Ержанов К.К.	PhD, ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Кайнарбай А.Ж.	к.ф.-м.н., ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Козловский А.Л.	PhD, РГП «Институт ядерной физики», Астана, Казахстан
Морзабаев А.К.	к.ф.-м.н., ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Салиходжа Ж.М.	к.ф.-м.н., ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Усеинов А.Б.	PhD, ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Джансейтов Д.М.	PhD, РГП «Институт ядерной физики», Астана, Казахстан
Шункеев К.Ш.	д.ф.-м.н., Актюбинский региональный государственный университет имени К. Жубанова, Актобе, Казахстан
Исадыков А.Н.	PhD, Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия
Шарафуллин И.Ф.	д.ф.-м.н., Башкирский государственный университет, Уфа, Россия
Сакута С.Б.	д.ф.-м.н., Национальный исследовательский институт Курчатовский институт, Москва, Россия
Лущик А.Ч.	д.ф.-м.н., Тартуский университет, Тарту, Эстония
Попов А.И.	д.ф.-м.н., Латвийский университет, Рига, Латвия
Хоши М.	PhD, Университет Хиросимы, Хиросима, Япония
Тойода Ш.	PhD, Университет Науки Окаямы, Окаяма, Япония
Ертурк С.	PhD, Университет Нийде, Нийде, Турция
Килин Д.	PhD, Государственный университет Северной Дакоты, Фарго, США
Юлун Хан	PhD, Государственный университет Северной Дакоты, Фарго, США

Адрес редакции: 010008, Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2
Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, каб. 402
Тел: +7(7172) 709-500 (вн. 31-315). E-mail: vest_phys@enu.kz

Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева
Серия ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ

Собственник: НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева»

Периодичность: 4 раза в год

Зарегистрирован Министерством информации и коммуникаций Республики Казахстан

Свидетельство о постановке на переучет № KZ66VPY00031918 от 02.02.2021 г.

Адрес типографии: 010008, Казахстан, г. Астана, ул. Кажымукана, 13/1,

Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева

Тел.: +7(7172)709-500 (вн.31-315). Сайт: <http://bulphysast.enu.kz>

МАЗМҰНЫ/ CONTENTS/ СОДЕРЖАНИЕ

- А.А. Баграмова, К.Ш. Жумадилов, А. Сакагучи.** Ақмола облысы Степногорск ауданындағы радиациялық жағдайды талдау
A. Bagratova, K. Zhumadilov, A. Sakaguchi. Comparative analysis of the radiation situation in the Stepnogorsk district in the Akmola region 6
- Н.Е. Ақтаев.** Қозған атом ядроларының динамикалық бөліну моделінің сәйкестігі
N. Aktaev. Adequacy of the dynamic model of fission of excited atomic nuclei
Н.Е. Ақтаев. Адекватность динамической модели деления возбуждённых атомных ядер 13
- Н.Х. Назиркулов, Н.А. Бурамбаева.** Локомотивтерге арналған схемәшілік диагностика және баспалық платаларды жобалау бойынша жүйелік тәсіл
N. Nazirkulov, N. Burambaeva. A systematic approach to in-circuit diagnostics and design of printed circuit boards for locomotives
Н.Х. Назиркулов, Н.А. Бурамбаева. Системный подход по внутрисхемной диагностике и проектированию печатных плат для локомотивов 29
- Ж.Б. Ергожина, А.Б. Касымов, Г.Н. Байтанатова, Г.А. Баймуханова.** Vitalbeam сызықтық үдеткішінде сәулелік терапиядағы көлемдік модуляцияланған дозалық терапияның (vmat) сапасын бақылау
Zh. Yergozhina, A. Kassymov, G. Baitanatova, G. Baimukhanova. Quality control of intensity-modulated plans (volumetric modulated arc therapy - vmat) in radiation therapy on the vitalbeam linear accelerator
Ж.Б. Ергожина, А.Б. Касымов, Г.Н. Байтанатова, Г.А. Баймуханова. Контроль качества планов с модуляцией интенсивности (volumetric modulated arc therapy - vmat) в лучевой терапии на линейном ускорителе vitalbeam 41

**A. Bagramova¹, K. Zhumadilov¹, A. Sakaguchi²**¹*L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*²*University of Tsukuba, Tsukuba, Japan**(E-mail: assel.yaf.enu@gmail.com, zhumadilovk@gmail.com, ayaskgc@ied.tsukuba.ac.jp)***Comparative analysis of the radiation situation in the Stepnogorsk district in the Akmola region**

Abstract. The territory of the Akmola region is characterized by the presence of a number of radiation factors caused by natural and man-made manifestations of increased radioactivity, the main of which are numerous areas of anomalous increases in natural radioactivity, uranium deposits and ore occurrences, as well as long-term large-scale activities of uranium mines and enterprises for the extraction of other minerals, with associated uranium mineralization.

In this article, we will show the results of a study of pollution in the Stepnogorsk district in recent years and demonstrate the analysis of the data. The article will analyze the research data of 2016 and 2020. Comparison of the results showed that the concentration of pollution is present in high doses, in particular, special attention is paid to the village of Aksu.

Keywords: radioactivity, air pollution, EEVA, radon, soil pollution.

DOI: doi.org/10.32523/2616-6836-2022-141-4-6-12

Introduction

In 2015-2016, a scientific project was carried out, the study of which was «Study of the role of microRNA in the regulation of cellular processes induced by radiation for the development of molecular diagnostics and typing of lung tumors». In the course of the study, work was done to conduct assessments of radiation risks for the population in the Republic of Kazakhstan living in areas with a high radon content. Based on the results of this work, on the territory of the Republic of Kazakhstan, zones with an increased level of radon and its daughter decay products (DDP) of natural and technogenic origin were established: East Kazakhstan and Akmola regions [1].

The main criteria for identifying radon-hazardous zones are:

- Lack of development of loose sediment cover.
- The presence of magmatic formations of a predominantly acidic series.
- The presence of a manifestation of long-lived renewed and young tectonics.
- The presence of uranium deposits, manifestations and radioactive anomalies.
- Availability of water sources with radon manifestations.
- Presence of manifestations of high concentration of radon in the premises of settlements and cities [2].

In the Akmola region there is a large part of one of the world's largest North Kazakhstan uranium ore province, which includes more than 30 uranium deposits and ore occurrences of uranium, combined into 7 ore clusters, and several hundred radiation natural anomalies, which forms the uranium geochemical specialization of the region. The deposits were worked out by mining or opened by exploratory mine workings, which led to the formation of a large amount of radioactive waste. All these factors contribute to the manifestations of high radon activity in the region [3].

Stepnogorsk is a city in the Akmola region, with about 50 thousand inhabitants, which is located 185 km northeast of Astana (Fig. 1).

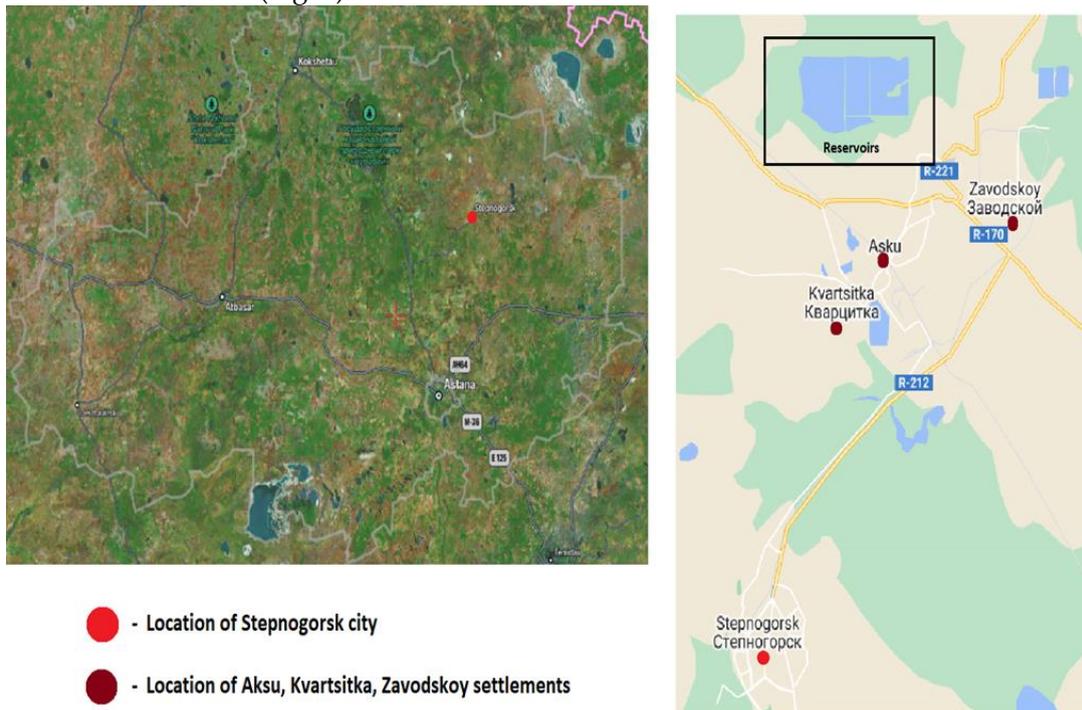


Figure 1. Map of Akmola region and locations of Stepnogorsk city and Aksu, Kvartsitka, Zavodskoy settlements [4]

The city of Stepnogorsk previously housed the Tselinny Mining and Chemical Combine, which was engaged in the extraction of uranium and other chemical elements for the nuclear industry, as well as the Stepnogorsk Scientific Experimental Industrial Base, where bacteriological weapons were developed and produced. Now Stepnogorsk is a city in which there are large enterprises, a chemical industry, gold is mined outside the city, in which cyanide breakthrough periodically occurs, there are burials of uranium waste and tailings.

The purpose of the work is to compare the data obtained from the studies of 2016 and 2020 and show an analysis of the changes.

In 2016, at the Astana Medical University, a report was made on the topic "Problems of radon safety in the Northern regions of Kazakhstan" from Berdimbaeva D.Sh. To conduct this study, settlements were selected in the Akmola region - Aksu, Zavodskoy, Kvartsytka, adjacent to the operating Stepnogorsk Mining and Chemical Plant (SMCP) and in the North Kazakhstan region, the Saumalkol settlement, located 5 km from the mothballed mining department No. 5 of Tselinnoye Mining - chemical plant. In this work, we measured the exposure dose rate of gamma radiation, the flux density of α - and β -particles, and the equivalent equilibrium volumetric activity (EEVA) of the daughter products of ^{222}Rn and ^{220}Rn radon isotopes in residential areas of settlements [5].

In 2020, the work of D. Ibrayeva was published on the topic "Radiation Situation in the Territories Affected by Mining Activities in Stepnogorsk Areas, Republic of Kazakhstan: Pilot Study". The purpose of this investigation was to study the radiation situation of the technogenically modified natural environment in the settlements of the Stepnogorsk region in order to understand the sources of pollution and the potential source of radiation hazard. For this, work was carried out to measure the equivalent equilibrium volumetric activity (EEVA) of radon in indoor air and to study the vertical distribution of the activity of the concentration of natural radionuclides (^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K) in the soil [6].

Research methods

In the work of Berdimbaeva D.Sh. radiometric measurements were carried out with «RKS-01-Solo» dosimeter and with Ramon-02 radon monitor. Pedestrian gamma survey on the territory of settlements was carried out using a network of 500 × 500 m with detailing in areas of radioactive contamination. At each of the identified sites, a detailed gamma survey was carried out using a 1x1m network with the measurement of gamma background, alpha and beta radiation.

In a 2020 study, the equivalent equilibrium volume activity of radon in indoor air was measured with Ramon-02 and Ramon-02A automatic small-sized radon and thoron radiometers [7]. The measurements were carried out in residential and administrative underground premises. And the concentration of radionuclide activity ^{232}Th , ^{226}Ra and ^{40}K in the soil was measured on the «Progress-BG» beta-gamma spectrometer with a NaI detector with a relative efficiency of no more than 30% [8].

Results and discussion

According to the results of a study in 2016, it turned out that in the Aksu village, the concentration of radon in administrative buildings exceeds 4 times, and in the private sector 5 times, compared with radiation safety standards (Fig. 2).

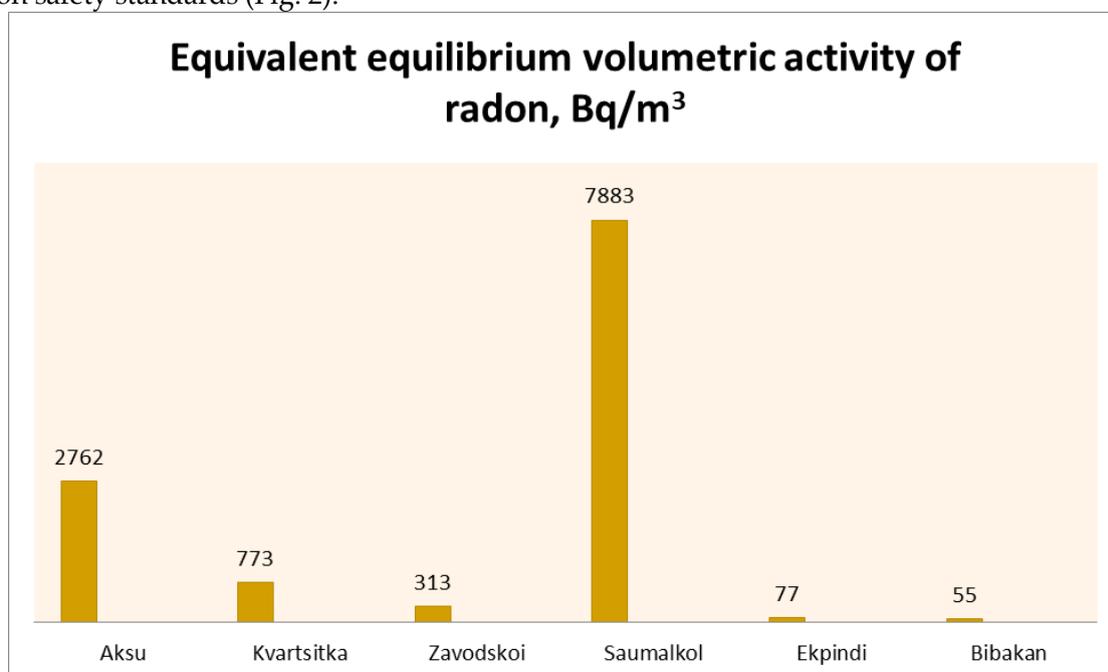


Figure 2. Equivalent equilibrium volume activity of radon, Bq m⁻³ [5]

In the private sector, in the area of the abandoned quarry in the Saumalkol settlement, a high level of radon concentration was detected, which exceeds the norm by 21 times.

Also, abnormally high radon activity was detected in a number of surveyed residential premises (Saumalkol, Aksu), probably associated with the use of local building materials containing elevated concentrations of natural radionuclides.

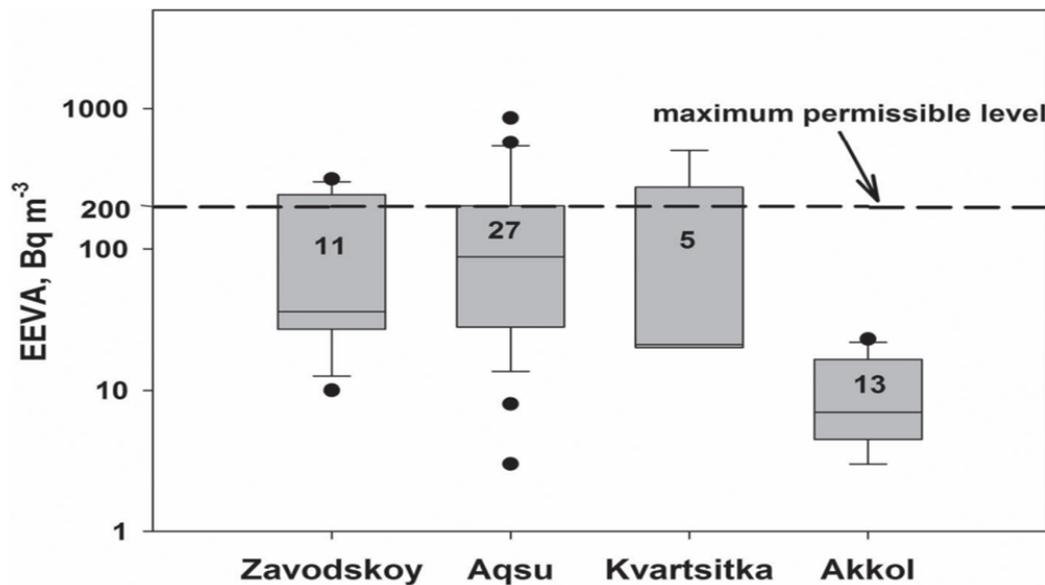


Figure 3. Measurement results equivalent equilibrium volumetric activity of radon in residential premises of Aksu, Zavodskoy, Kvartsytka and Akkol settlements, Bq m⁻³ [6]

The results of the study conducted in 2020 (Fig.3) showed that the main factor of the increased natural radiation background of the environment was not the impact of the removal of radionuclides from the territory of the tailings dump in the territory of the Akmola region. However, the high values of radon and soil pollution in abnormal areas in the studied territories could be explained by the fact that in the 1930s there was a gold mining site.

The equivalent equilibrium volume activity of radon (indoors) reaches values of 313-858 Bq m⁻³ (which exceeds the permissible level) in buildings located near former gold mining enterprises. High concentrations of the activity of natural radionuclides in the soil up to ²²⁶Ra-4060, ²³²Th-1170 and ⁴⁰K-4080 Bq/kg, respectively, were established on the territory of the former gold mining complex in Stepnogorsk district.

Conclusion

The results of 2016 showed that abnormally high radon activity was detected in a number of surveyed residential premises (Saumalkol, Aksu), probably associated with the use of local building materials containing elevated concentrations of natural radionuclides. And the results obtained in 2020 also revealed high concentrations of air and soil pollution near the location of gold mining. Ultra-high values of the equivalent equilibrium volume activity of radon were detected in the school premises of the village of Aksu.

Referring to the results of data from studies that were conducted in 2016 and 2020, it is possible to see buildings and territories with high local pollution. However, in 2016, the reason for such anomalies was the use of local building materials that contain elevated concentrations of natural radionuclides, and in 2020, these contaminants are explained by the location of the place where gold ore has been mined and processed since 1932.

References

1. Zhabaeva D.B., Kusainova A.A., Bulgakova O.V., Bersimbaeva R.I.. The level of circulating microRNA miR19 as a prognostic biomarker for lung cancer // Proceedings of the international scientific

- and practical conference "Methodology. Theory and practice of modern biology". - 2016. - P.127-13
2. Biyasheva Z.M., Zaripova Yu.A., Demakova O.V., Zhuralieva A.A. Some issues of protection against radon in Kazakhstan // Law series - 2020. - №3 - P.95. doi: 10.26577/JAPJ.2020.v95.i3.03.
 3. Fedorov G.V. Uranium production and environment in Kazakhstan [Electronic resource]. - IAEA CM-362/20. - P. 191-198. - Mode of access: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/032/33032913.pdf.
 4. Map of Earth – Mode of access: https://satellites.pro/Google_plan/Stepnogorsk_map.Aqmola.Kazakhstan
 5. Berdimbaeva D. Sh. Report: Issues of radon safety in the northern regions of Kazakhstan [Electronic resource]. – 2016. - Mode of access: <http://elib.sfu-ras.ru/bitstream/handle/2311/8978/Berdimbaeva.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
 6. Ibraeva D., Bakhtin M., Kashkinbaev E., Kazymbet P., Zhumadilov K., Altayeva N., Aumalikova M., Shishkina E. Radiation situation in the territories affected by mining operations in Stepnogorsk region, Republic of Kazakhstan: experimental study // Radiation protection dosimetry. - 2020. - No. 4. - S. 517-526. doi:10.1093/prd/ncaa068
 7. ASTM International. ASTM D6327–10 Standard Test Method for Determination of Radon Decay Product Concentration and Working Level in Indoor Atmospheres by Active Sampling on a Filter. West Conshohocken, PA: ASTM International. -2016.
 8. Spectrometric complexes for measuring the activity of alpha, beta and gamma-emitting nuclides. Execution number in the State Register of the Russian Federation: 15235–01. -2012.

А.А. Баграмова¹, К.Ш. Жумадилов¹, А. Сакагучи²

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

²Цукуба университеті, Цукуба, Жапония

Ақмола облысы Степногорск ауданындағы радиациялық жағдайды талдау

Аңдатпа. Ақмола облысының аумағы жоғары радиоактивтіліктің табиғи және техногендік көріністеріне байланысты бірқатар радиациялық факторлардың болуымен сипатталады. Олардың негізгілері: табиғи радиоактивтіліктің қалыптан тыс жоғарылауының көптеген аймақтары, уран кен орындары мен кен көріністері, сондай-ақ уран кеніштері мен уран минералдануы бар басқа да пайдалы қазбаларды өндіру жөніндегі кәсіпорындардың көпжылдық ауқымды қызметі. Бұл мақалада соңғы жылдардағы Степногорск ауданының ластануын зерттеу нәтижелері және алынған деректерді талдау көрсетіледі. Мақалада 2016 және 2020 жылдардағы зерттеу деректері талданады. Нәтижелерді салыстыру деректері арқылы ластану концентрациясы жоғары дозаларда екендігі көрінеді, әсіресе Ақсу ауылына ерекше назар аударылады.

Түйін сөздер: радиоактивтілік, ауаның ластануы, эквивалентті тепе-тең көлемдік белсенділік, радон, топырақтың ластануы.

А.А. Баграмова¹, К.Ш. Жумадилов¹, А. Сакагучи²

¹Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Астана, Казахстан

³Университет Цукуба, Цукуба, Япония

Сравнительный анализ радиационной обстановки Степногорского района в Акмолинской области

Аннотация. Территория Акмолинской области характеризуется наличием целого ряда радиационных факторов, обусловленных естественными и техногенными проявлениями

повышенной радиоактивности, главными из которых являются многочисленные участки аномальных повышений природной радиоактивности, урановые месторождения и рудопроявления, а также многолетняя масштабная деятельность урановых рудников и предприятий по добыче других полезных ископаемых, с сопутствующей урановой минерализацией. В данной статье мы покажем результаты исследования загрязнения Степногорского района за последние годы и продемонстрируем анализ данных. В статье будут анализированы данные исследований 2016 и 2020 годов. Сравнения результатов показал, что концентрация загрязнения присутствует в повышенных дозах, в особенности особое внимание уделяется поселку Аксу.

Ключевые слова: радиоактивность, загрязнение воздуха, ЭРОА, радон, загрязнения почвы.

References

1. Zhabaeva D.B., Kusainova A.A., Bulgakova O.V., Bersimbaeva R.I. The level of circulating microRNA miR19 as a prognostic biomarker for lung cancer // Proceedings of the international scientific and practical conference "Methodology. Theory and practice of modern biology". - 2016. - P.127-13
2. Biyasheva Z.M., Zaripova Yu.A., Demakova O.V., Zhuralieva A.A. Some issues of protection against radon in Kazakhstan // Law series - 2020. - №3 - P.95. doi: 10.26577/JAPJ.2020.v95.i3.03.
3. Fedorov G.V. Uranium production and environment in Kazakhstan [Electronic resource]. - IAEA CM-362/20. - P. 191-198. - Mode of access: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/032/33032913.pdf.
4. Map of Earth – Mode of access: https://satellites.pro/Google_plan/Stepnogorsk_map.Aqmola.Kazakhstan
5. Berdimbaeva D. Sh. Report: Issues of radon safety in the northern regions of Kazakhstan [Electronic resource]. – 2016. - Mode of access: <http://elib.sfu-ras.ru/bitstream/handle/2311/8978/Berdimbaeva.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
6. Ibraeva D., Bakhtin M., Kashkinbaev E., Kazymbet P., Zhumadilov K., Altayeva N., Aumalikova M., Shishkina E. Radiation situation in the territories affected by mining operations in Stepnogorsk region, Republic of Kazakhstan: experimental study // Radiation protection dosimetry. - 2020. - No. 4. - S. 517-526. doi:10.1093/prd/ncaa068
7. ASTM International. ASTM D6327–10 Standard Test Method for Determination of Radon Decay Product Concentration and Working Level in Indoor Atmospheres by Active Sampling on a Filter. West Conshohocken, PA: ASTM International. -2016.
8. Spectrometric complexes for measuring the activity of alpha, beta and gamma-emitting nuclides. Execution number in the State Register of the Russian Federation: 15235–01. -2012.

Information about authors:

А.А. Баграмова – PhD докторант, Евразийский национальный университет, Кажымукан 13, г. Астана, Казахстан.

К.Ш. Жумадилов – PhD, профессор, заведующий "Международной кафедры ядерной физики, новых материалов и технологий", Евразийский национальный университет, Кажымукан 13, г. Астана, Казахстан.

А. Сакагучи – доцент в центре исследований изотопов и динамики окружающей среды, Университет Цукуба, 1-1-1 Теннодай, г. Цукуба, префектура Ибараки, Япония.

А.А. Баграмова – PhD докторанты, Еуразия ұлттық университеті, Кажымұқан 13, Астана, Қазақстан.

К.Ш. Жумадилов – PhD докторы, профессор, Еуразия ұлттық университеті «Ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар» кафедрасының меңгерушісі, Кажымұқан 13, Астана, Қазақстан.

А. Сакагучи – доцент, изотоптар мен қоршаған орта динамикасын зерттеу орталығы, Цукуба университеті, 1-1-1 Теннодай, Цукуба, Ибараки префектурасы, Жапония.

A.A. Bagratova – PhD student, Eurasian National University, Kazhymukan 13, Astana, Kazakhstan.

K.Sh. Zhumadilov – PhD, Professor, Head of the "International Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies", Eurasian National University, Kazhymukan 13, Astana, Kazakhstan.

A. Sakaguchi – Associate Professor, Center for Research in Isotopes and Environmental Dynamics,, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki Prefecture, Japan.

Адекватность динамической модели деления возбуждённых атомных ядер

Аннотация. В работе представлена модель деления возбужденных атомных ядер. Основой модели является стохастическое дифференциальное уравнение Ланжевена. Амплитуда ланжевенского источника характеризуется белым шумом. Адекватность моделирования тестируется двумя способами: сравнением аналитического решения уравнения Ланжевена с численным в режиме гармонического осциллятора и сравнением результатов численного моделирования с результатами, полученными другими авторами. Показано, что в обоих случаях результаты динамического моделирования обеспечивают достаточную точность.

Ключевые слова: атомное ядро, уравнения Ланжевена, методом Эйлера, уравнению Фоккера-Планка, деления ядра.

DOI: doi.org/10.32523/2616-6836-2022-141-4-13-28

Введение

Впервые динамическое моделирование процесса деления удалось реализовать в 1986 году Я. Абе с сотрудниками [1]. Адекватность построенной ими модели была доказана посредством сравнения результата численного моделирования с известным аналитическим решением [2,3]. Для описания динамики деления использовались стохастические уравнения Ланжевена (УЛ), которые с физической точки зрения эквивалентны уравнению Фоккера-Планка. Численное решение УЛ осуществлялось методом Эйлера [4]. Путём численного решения УЛ была построена временная зависимость скорости деления. Оказалось, что эта скорость на начальной стадии нелинейно возрастала от нуля до квазистационарного значения. Более того, динамическая квазистационарная скорость деления (КССД) неплохо согласовалась с аналитической крамерсовской скоростью деления [5]. Таким образом, построенная динамическая модель хорошо отражала диссипативную динамику деления ядра. Подобные модели распространены для случая одной [6-21], двух [22-26] и трёх [27-31] степеней свободы. В настоящей работе проводятся более весомые аргументы в пользу адекватности динамического моделирования.

Описание динамической модели

Мы моделируем процесс деления ядра, как блуждание воображаемой броуновской частицы БЧ в пространстве коллективных переменных p и q . В роли коллективной координаты q выступает расстояние между центрами масс будущих осколков, выраженное в единицах диаметра D_0 сферического ядра. В начальный момент времени $t_0 = 0$ все ядра находятся в одной точке фазового пространства: $q_0 = q_{qs} = 0.375$, $p_0 = 0$. Такие начальные условия соответствуют экспериментальной ситуации, описанной в работе [32]. Движение БЧ описывается полными уравнениями Ланжевена.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -V'(q) & -\beta \\ 0 & m^{-1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_c(t) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Случайная сила $\psi_C(t)$ имеет свойства

$$\begin{aligned}\langle \psi_C(t) \rangle &= 0 \\ \langle \psi_C(t) \psi_C(t') \rangle &= 2D_p \delta(t-t')\end{aligned}\quad (2)$$

где $\delta(t-t')$ – дельта-функция Дирака. В случае $\beta \gg \omega_{sd}$ движение БЧ носит характер аperiodического затухания. При этом импульс p релаксирует быстро (за время $\tau_p = \beta^{-1}$), тогда как для релаксации координаты q требуется больше времени ($\tau_q = \beta \omega_{sd}^{-2}$). В таком режиме движение БЧ удобно описывать с помощью редуцированного уравнения Ланжевена

$$\frac{dq}{dt} = -\eta^{-1} V'(q) + \psi_o(t), \quad (3)$$

где $\psi_o(t)$ имеет тот же физический смысл, что и $\psi_C(t)$, и удовлетворяет условиям

$$\begin{aligned}\langle \psi_o(t) \rangle &= 0 \\ \langle \psi_o(t) \psi_o(t') \rangle &= 2D_q \delta(t-t')\end{aligned}\quad (4)$$

Полные и редуцированные уравнения Ланжевена (1) и (3) в разностной форме можно представить соответственно как

$$\begin{aligned}p_{n+1} &= p_n - [V'(q_n) + p_n \beta] \tau + w(t_n) \sqrt{D_p \tau}, \\ q_{n+1} &= q_n + p_n m^{-1} \tau\end{aligned}\quad (5)$$

и

$$q_{n+1} = q_n - \eta^{-1} V'(q_n) \tau + w(t_n) \sqrt{D_q \tau}, \quad (6)$$

где τ – шаг моделирования, $w(t_n)$ – распределённое по Гауссу случайное число, удовлетворяющее условиям

$$\begin{aligned}\langle w(t_n) \rangle &= 0 \\ \langle w(t_n) w(t_m) \rangle &= 2\delta_{nm}\end{aligned}\quad (7)$$

где δ_{nm} – дельта Кронекера.

Две типичные траектории БЧ, полученные с помощью компьютерного моделирования, изображены на рисунке 1.

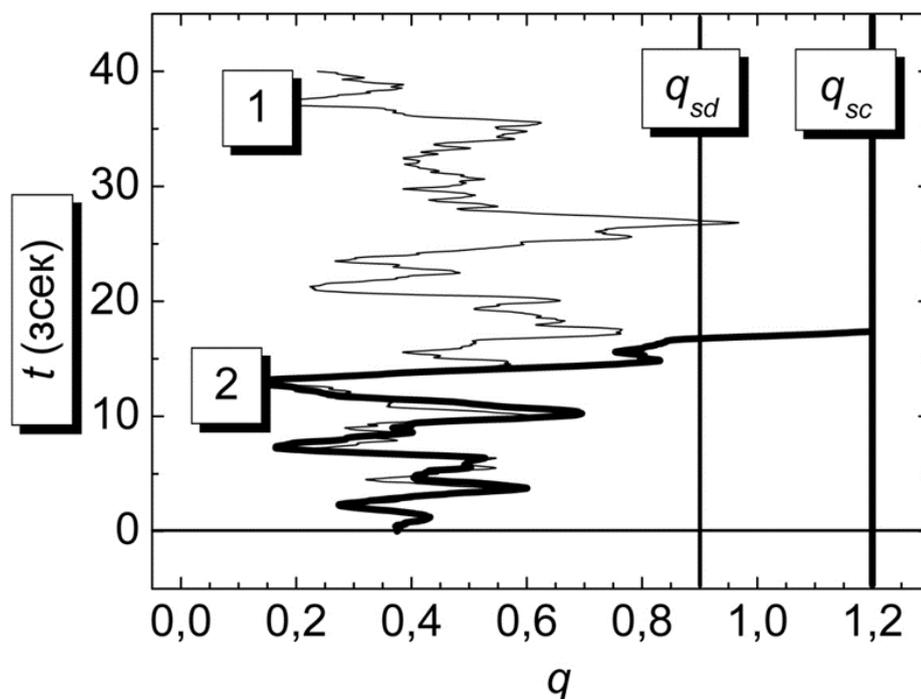


Рисунок 1. Типичные траектории движения БЧ: 1 – траектория не пересекла точку разрыва $q_{sc} = 1.2$, следовательно, ядро не поделилось. 2 – траектория пересекла q_{sc} , что привело к делению. Расчёты выполнены при $B_f = 6$ МэВ, 1) $T = 9.5$ МэВ, $\beta = 4$ зсек⁻¹; 2) $T = 10.5$ МэВ, $\beta = 1$ зсек⁻¹. Вертикальными линиями показаны координаты седловой точки q_{sd} (тонкая линия) и точки разрыва (толстая линия) q_{sc}

Траектории типа 1 отвечают равновесным флуктуациям вблизи квазистационарного состояния. Однако иногда за счет последовательности однонаправленных флуктуаций возникают траектории типа 2, которые приводят к делению. Моделирование каждой траектории длится либо фиксированное время t_D , либо до момента деления t_f , когда траектория пересекает точку разрыва q_{sc} . Точки q_{qs} , q_{sd} , q_{sc} будем называть ключевыми точками потенциала (КЧ).

Одной из основных количественных характеристик делительного процесса является скорость деления (СД). С точки зрения ланжевеновского формализма её можно выразить соотношением

$$R_{fD}(t) = [N_{tot} - N_{fD}(t)]^{-1} \frac{dN_{fD}(t)}{dt}, \tag{8}$$

где N_{tot} – полное число траекторий, участвующих в моделировании, $N_{fD}(t)$ – число траекторий, достигших точки разрыва к моменту времени t . Соотношение (8) можно переписать в виде удобном для моделирования как

$$R_{fDi} = N_{fDi} \left[\Delta t_b \cdot \left(N_{tot} - \sum_{j=0}^i N_{fDj} \right) \right]^{-1}, \tag{9}$$

где Δt_b – ширина временного бина, N_{fDi} – число траекторий, поделившихся в течение i -го бина. Типичная временная зависимость скорости деления $R_{fD}(t)$, полученная путём численного моделирования, изображена на рисунке 2.

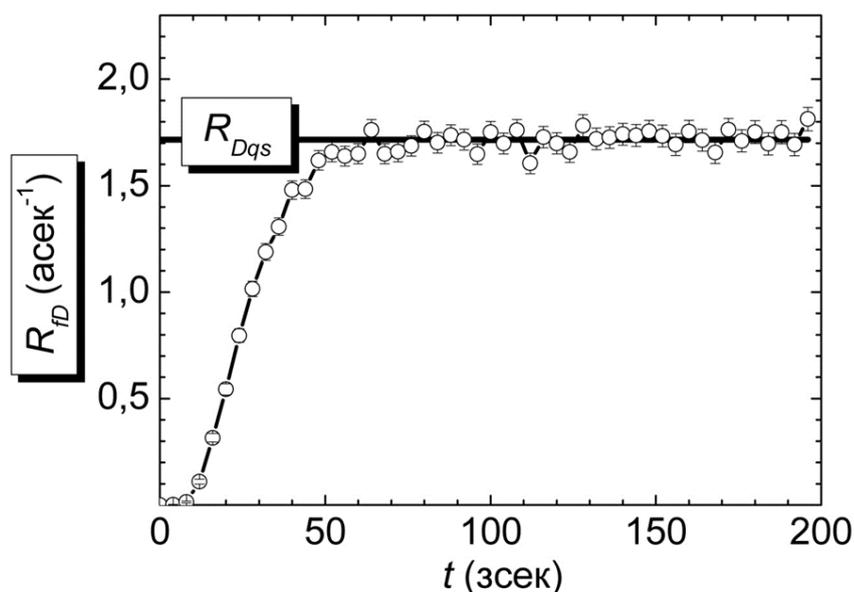


Рисунок 2. Временная зависимость скорости деления $R_{fD}(t)$ (тонкая линия с открытыми круглыми символами). Динамическая квазистационарная скорость деления R_{Dqs} показана толстой линией. Моделирование выполнено при $B_f = 6 \text{ МэВ}$, $q_{qs} = 0.375$, $q_{sd} = 0.9$, $q_{sc} = 1.2$, $m = 100 \text{ МэВ} \cdot \text{зсек}^2$, $T = 3 \text{ МэВ}$, $\beta = 15 \text{ зсек}^{-1}$, $N_{tot} = 2 \cdot 10^5$, $\tau = 0.5 \text{ зсек}$, $\Delta t_b = 4 \text{ зсек}$.

На рисунке 2 отчётливо видна релаксация временной зависимости скорости деления к квазистационарному значению R_{Dqs} . Выход $R_{fD}(t)$ на плато является одним из аргументов в пользу того, что построенная нами динамическая модель адекватна.

Входными параметрами модели являются: начальные значения обобщённых импульса p_0 и координаты q_0 , A – массовое число делящегося ядра, a – параметр плотности одночастичных уровней энергии ядра, B_f – высота барьера деления, Δt_b – ширина временного бина, E_{tot}^* – полная энергия возбуждения ядра, m – инерционный параметр, N_{tot} – полное число ядер, участвующих в моделировании, q_{qs} – координата квазистационарного состояния, q_{sd} – координата седловой точки, q_{sc} – координата точки разрыва, T – температура ядра, t_D – время динамического моделирования, Z – зарядовое число делящегося ядра, β – коэффициент затухания.

В модели предусмотрены следующие опции: использование полных или редуцированных уравнений Ланжевена, использование канонического или микроканонического ансамбля, возможность проводить моделирование с шестью различными потенциалами, расчёт крамерсовской скорости деления [5] в широком диапазоне коэффициента затухания.

Адекватность динамической модели

Гармонический осциллятор. Первый способ оценки адекватности по-строенной модели, основан на аналитическом решении уравнений Ланжевена для гармонического осциллятора (АРГО). Аналитический метод решения этих уравнений подробно представлен в работах [2,3]. В связи с этим мы не будем заново излагать ход аналитического решения УЛ, а остановимся только на интересующих нас результатах.

Поместим ансамбль броуновских частиц в потенциал, имеющий вид

$$V^{HO}(q) = m(\omega_{HO}q)^2 / 2. \quad (10)$$

где ω_{HO} – абсолютное значение «частоты» гармонического осциллятора. В таком потенциале БЧ в результате действия на них ланжевеновского источника будут двигаться случайным образом. Плотность вероятности в этом случае запишется в виде двумерного распределения Гаусса

$$\rho(\Delta p, \Delta q, t) = \left[2\pi\sigma_p\sigma_q\sqrt{1-\varphi^2} \right]^{-1} \times \exp \left[-\left\{ 2(1-\varphi^2) \right\}^{-1} \left(\frac{\Delta p^2}{\sigma_p^2} + \frac{\Delta q^2}{\sigma_q^2} - \frac{2\varphi\Delta p\Delta q}{\sigma_p\sigma_q} \right) \right], \quad (11)$$

где $\Delta p = p - \langle p \rangle$, $\Delta q = q - \langle q \rangle$, σ_p^2 и σ_q^2 – соответствующие дисперсии импульса и координаты БЧ, φ – коэффициент корреляции этих величин.

Точное аналитическое решение уравнений Ланжевена позволяет найти выражения для средних значений p и q

$$\langle p \rangle = m \exp(-\beta t / 2) \times \left[v_0 \left(\cos \tilde{\omega}_{HO} t - 0.5\beta\tilde{\omega}_{HO}^{-1} \sin \tilde{\omega}_{HO} t \right) - q_0\omega_{HO}^2\tilde{\omega}_{HO}^{-1} \sin \tilde{\omega}_{HO} t \right], \quad (12)$$

$$\langle q \rangle = \exp(-\beta t / 2) \times \left[q_0\tilde{\omega}_{HO}^{-1} \left(\beta \sin \tilde{\omega}_{HO} t + 2\tilde{\omega}_{HO} \cos \tilde{\omega}_{HO} t \right) / 2 + v_0\tilde{\omega}_{HO}^{-1} \sin \tilde{\omega}_{HO} t \right], \quad (13)$$

где $\tilde{\omega}_{HO} = (\omega_{HO}^2 - \beta^2 / 4)^{1/2}$.

Дисперсии величин p и q имеют вид

$$\sigma_p^2 = \frac{D_p}{2\tilde{\omega}_{HO}^2} \left[\exp(-\beta t) \left(\frac{\beta}{2} \cos 2\tilde{\omega}_{HO}^2 t + \tilde{\omega}_{HO} \sin 2\tilde{\omega}_{HO}^2 t - \frac{2\omega_{HO}^2}{\beta} \right) + \frac{2\tilde{\omega}_{HO}^2}{\beta} \right], \quad (14)$$

$$\sigma_q^2 = \frac{T\beta}{2m\tilde{\omega}_{HO}^2} \left[\exp(-\beta t) \left(\frac{\beta}{2\omega_{HO}^2} \cos 2\tilde{\omega}_{HO} t - \frac{\tilde{\omega}_{HO}}{\omega_{HO}^2} \sin 2\tilde{\omega}_{HO} t - \frac{2}{\beta} \right) + \frac{2\tilde{\omega}_{HO}^2}{\beta\omega_{HO}^2} \right], \quad (15)$$

Коэффициент корреляции p и q запишется как

$$\varphi = \left[\sigma_p\sigma_q \right]^{-1} \text{cov}_A(p, q), \quad (16)$$

где

$$\text{cov}_A(p, q) = T\beta \left[\tilde{\omega}_{HO}^{-1} \sin \tilde{\omega}_{HO} t \right]^2 \exp(-\beta t). \quad (17)$$

Итак, мы имеем выражения, описывающие временную эволюцию величин $\langle p \rangle$, $\langle q \rangle$, σ_p^2 , σ_q^2 и φ . С другой стороны, значения этих же величин во времени можно получить, выполняя численное моделирование. Если модель построена корректно, то следует ожидать согласие АРГО и результатов численного моделирования (РЧМ).

Выполним моделирование, выбирая следующие параметры: $m = 100$ МэВ·зсек², $\omega_{HO} = 2$

зсек⁻¹, $\beta = 2$ зсек⁻¹, $T = 1.5$ МэВ, $N_{tot} = 10^4$, $\tau = 7$ асек⁻¹. Начальные условия определим, как $p(0) = 0$, $q(0) = 0$, $\sigma_{p(0)}^2 = 0$, $\sigma_{q(0)}^2 = 0$. Сравнение АРГО и РЧМ представлено на рисунках 3, 4.

На рисунках 3 (а, б, в, г) и 4 (а) сплошной линией показано АРГО. Видно, что значения для пяти наблюдаемых ($\langle p \rangle$, $\langle q \rangle$, σ_p^2 , σ_q^2 , φ^2), полученные в результате численного моделирования, в пределах статистических погрешностей не отличаются от АРГО.

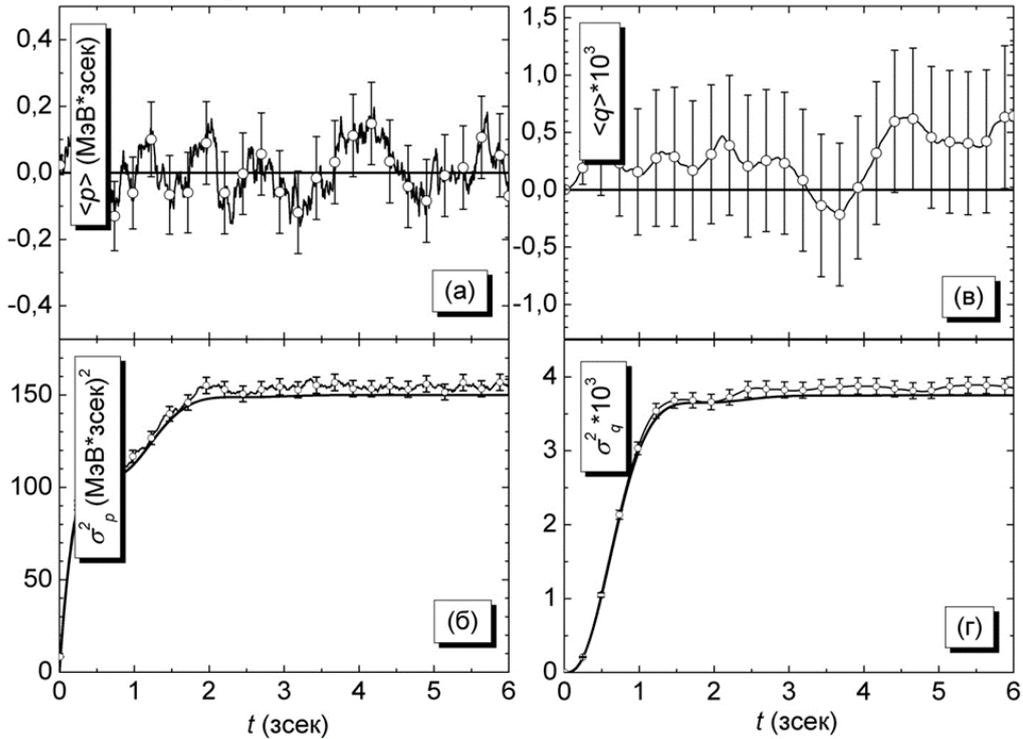


Рисунок 3. Анализ адекватности модели. (а) Среднее значение импульса $\langle p \rangle$, (б) его дисперсия σ_p^2 . (в) Среднее значение координаты $\langle q \rangle$, (г) её дисперсия σ_q^2 . АРГО (сплошная линия, РЧМ (круглые символы)

На рисунке 4 (б) показаны временные эволюции средних значений энергий БЧ: кинетической $\langle U_{Ax} \rangle = \langle p^2 \rangle / 2m$ и потенциальной $\langle V_{Ax} \rangle = m\omega_{HO}^2 \langle q^2 \rangle / 2$.

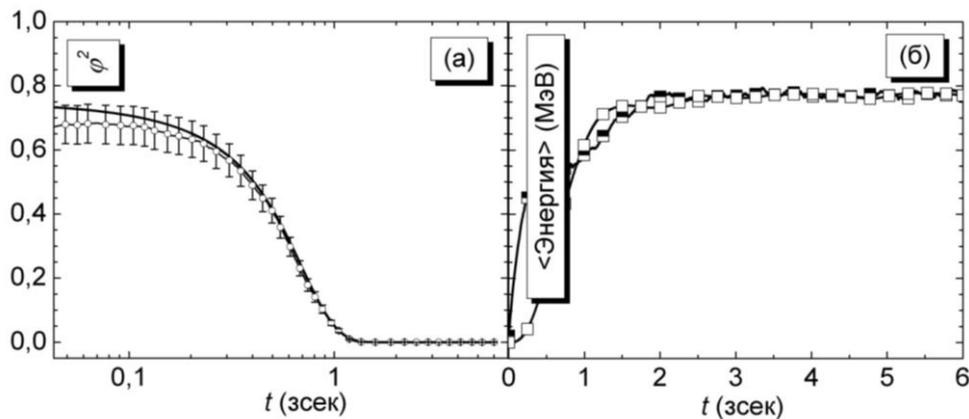


Рисунок 4. Анализ адекватности модели. (а) Квадрат коэффициента корреляции φ^2 :

АРГО (сплошная линия), РЧМ (круглые символы). (б) Средние значения кинетической $\langle U_{Ax} \rangle$ (полузакрытые символы) и потенциальной $\langle V_{Ax} \rangle$ (открытые символы) энергий БЧ. Статистические погрешности на панели (б) не выходят за границы символов

Спустя некоторое время релаксации $\tau_{UV} \geq 2$ зсек эти средние значения энергий становятся равны между собой, что соответствует теореме о вириале [33].

Более того, на рисунке 4 (б) наблюдается соответствие теореме о равномерном распределении энергии по степеням свободы: в состоянии равновесия средняя кинетическая энергия теплового движения, приходящаяся на каждую степень свободы (в простейшем случае – на каждую из декартовых координат), равна $T/2$. В нашем случае $T/2 = 0.75$ МэВ и $\langle U_{Ax} \rangle = \langle V_{Ax} \rangle \approx 0.75$ МэВ.

Сравнение с предшественниками. Второй способ оценки адекватности построенной ДМ заключается в сравнении с результатами работы [34]. Авторы этой работы (предшественники) решали задачу идентичную нашей: выход БЧ из потенциальной ямы. Динамика движения БЧ описывалась с помощью уравнения Смолуховского (УС)

$$\frac{\partial \rho(q,t)}{\partial t} = \eta^{-1} \frac{\partial}{\partial q} \left[\rho(q,t) \frac{dV}{dq} \right] + D_q \frac{\partial^2 \rho(q,t)}{\partial q^2}. \quad (18)$$

В качестве потенциала V использовался бистабильный потенциал Бринкмана (BP) [35-43], который выражается соотношением

$$V^{BP}(q) = B_f (q^2 - 1)^2. \quad (19)$$

Деформационная зависимость BP изображена на рисунке 5.

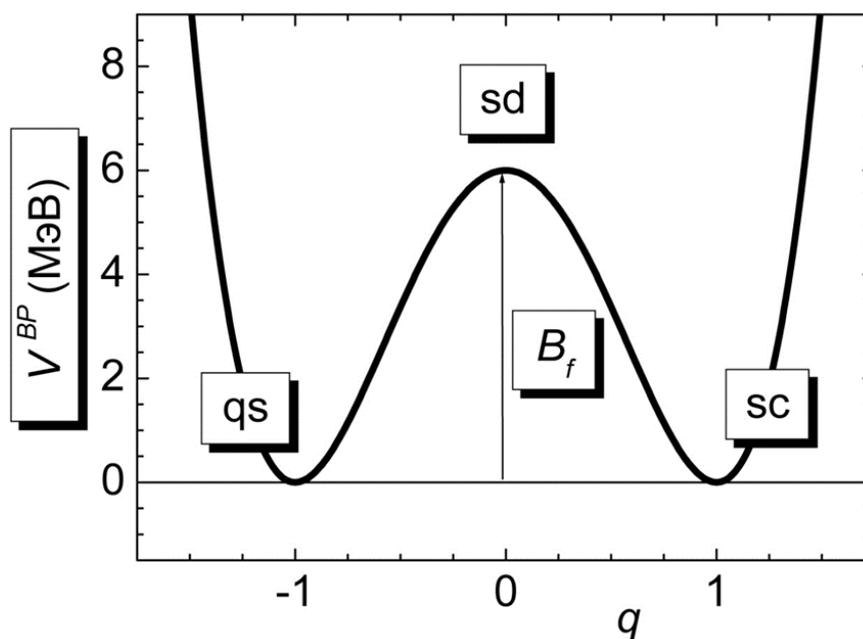


Рисунок 5. Деформационная зависимость BP

Поток вероятности частиц через барьер B_f выражался, как

$$J(q,t) = \eta^{-1} \rho(q,t) \frac{dV}{dq} - D_q \frac{\partial \rho(q,t)}{\partial q} \quad (20)$$

Начальные условия соответствовали $\rho(q,0|q_{qs}) = \delta(q - q_{qs})$.

Для нахождения решения $\rho(q,t|q_0)$ авторы [29] воспользовались методом, описанным в [32]. Согласно этому методу, необходимо выполнить замену

$$\rho(q,t) = \Psi(q) \exp[-\tilde{\lambda}t - V/2T]. \quad (21)$$

где $\Psi(q)$ – волновая функция. Тогда

$$\frac{\partial \rho(q,t)}{\partial t} = -\tilde{\lambda} \Psi(q) \exp\left[-\tilde{\lambda}t - \frac{V}{2T}\right]. \quad (22)$$

$$\frac{\partial^2 \rho(q,t)}{\partial q^2} = -\frac{\exp[-\tilde{\lambda}t - V/2T]}{2T} \left\{ -\frac{(V')^2}{2T} + V'' + 2V' \frac{d}{dq} + \frac{d^2}{dq^2} \right\} \Psi(q). \quad (23)$$

Подставляя (22), (23) в (18), имеем

$$\frac{d^2}{dq^2} \Psi(q) + \left[\frac{V''}{2T} - \frac{(V')^2}{4T^2} + \frac{\tilde{\lambda}\eta}{T} \right] \Psi(q) = 0. \quad (24)$$

Это уравнение представляет собой уравнение для $\Psi(q)$, с собственными значениями $\tilde{\lambda}_n$ и собственными функциями $\Psi_n(q)$. При $\tilde{\lambda}_0 = 0$, $\Psi_0(q) = \exp[-V(q)/2T]$ и $\tilde{\lambda}_n > 0$ при $n > 0$. Собственные функции нормализованы как

$$\int \Psi_n(q) \Psi_m(q) dq = \delta_{nm}. \quad (25)$$

Тогда условие нормировки для $\rho_n(q) = \exp[-V(q)/2T] \Psi_n(q)$ запишется

$$\int \rho_n(q) \rho_m(q) \exp[V(q)/T] dq = \delta_{nm}. \quad (26)$$

Плотность вероятности $\rho(q,t|q_0)$ можно представить в виде

$$\rho(q,t|q_0) = \sum_{n=0}^{\infty} \Omega_n \rho_n(q) \exp(-\tilde{\lambda}_n t). \quad (27)$$

Коэффициент Ω_n определяется из начальных условий, как

$$\Omega_n = \rho_n(q_0) \exp[V(q_0)/T]. \quad (28)$$

В разложении суммы в (27) авторы [82] решили ограничиться двумя слагаемыми. Аргументация такого ограничения заключалась в том, что при $T^{-1}B_f \geq 6$ имеем $\tilde{\lambda}_1 < 3 \cdot 10^{-3}$. Следовательно, остальные слагаемые в (27) практически не будут вносить вклад в $\rho(q,t|q_0)$. Поэтому решение (18) представлялось в виде

$$\rho(q,t) = \rho_0(q) + \rho_0^{-1}(q_0) \rho_1(q) \rho_1(q_0) \exp(-\tilde{\lambda}_1 t). \quad (29)$$

Таким образом, исходя из уравнения непрерывности, поток вероятности

$$J(0,t) = -\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^0 \rho(q,t) dq \text{ запишется, как}$$

$$J(0,t) = \tilde{\lambda}_1 \exp(-\tilde{\lambda}_1 t) \rho_1(q_0) \rho_0^{-1}(q_0) \int_{-\infty}^0 \rho_1(q) dq. \quad (30)$$

Для оценки интеграла в выражении (30) были выполнены некие приближения, которые нас мало интересуют. В результате этих приближений, квазистационарный поток вероятности через барьер

$$J_{qs} = \tilde{\lambda}_1 \cdot \Theta, \quad (31)$$

где $\Theta \approx 0.5$.

Значение для J_{qs} получено в результате аналитического решения УС. Это уравнение с физической точки зрения эквивалентно РУЛ, которое мы использовали при моделировании. В результате моделирования нами была получена квазистационарная скорость деления R_{Dqs} , которая является аналогом J_{qs} . Также были получены R_I, R_O соответствующие J_I, J_O . Таким образом, мы можем сравнить наши результаты, полученные с помощью численного моделирования, с результатами [29], полученными с помощью аналитического решения УС. Совпадение наших результатов с результатами предшественников, при одинаковых входных параметрах, послужит дополнительным аргументом в пользу адекватности нашей модели.

Сравнение результатов представлено на рисунке 6. Закрытыми символами показаны результаты предшественников, а открытыми – наши результаты. Следует отметить, что на панели (а) представлены отношения скоростей либо потоков, а именно: $J_{qs} / J_I, R_{Dqs} / R_I$ соответственно закрытые и открытые треугольники; $J_{qs} / J_O, R_{Dqs} / R_O$ – открытые и закрытые круглые символы. На панели (б) показана, относительная разница χ , которая определяется, как $R_O / R_I - 1$ либо $J_O / J_I - 1$.

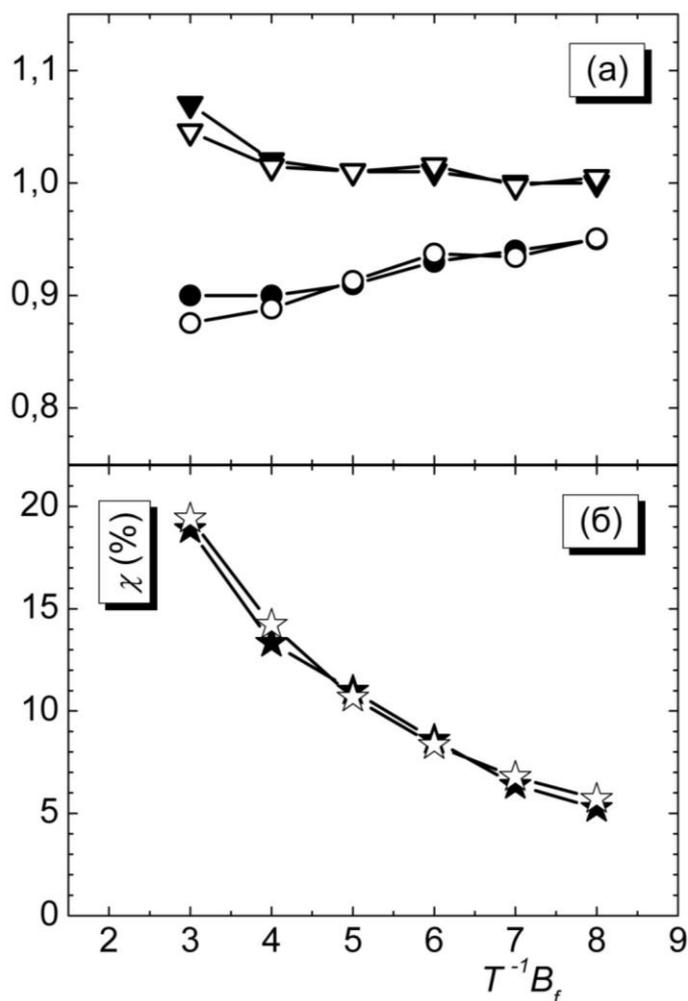


Рисунок 6. Сравнение наших результатов (открытые символы) с предшественниками [29] (закрытые символы). а) $J_{qs}/J_l, R_{Dqs}/R_l$ (треугольники). б) χ (круглые символы).

Динамическое моделирование выполнено для ВР при $\beta = 15$ зсек $^{-1}$, $m = 100$ МэВ·зсек 2 .

Параметры N_{tot}, T, t_D, τ варьировались. На обеих панелях статистические погрешности не превосходят размеров символов

Из рисунка видно, что согласие наших расчётов с результатами предшественников наблюдается на всём рассматриваемом диапазоне $T^{-1}B_f$. Это согласие является ещё одним аргументом в пользу адекватности построенной динамической модели.

Заключение

Описана динамическая модель деления возбуждённых атомных ядер. При этом процесс деления ядра представлялся, как блуждание воображаемой броуновской частицы в пространстве коллективных переменных p и q . В качестве динамических уравнение использованы стохастические уравнения Ланжевена. Приведены аргументы в пользу адекватности модели. Одним из аргументов является статистическое согласие численного и аналитического решений полных уравнений Ланжевена. Вторым аргументом выступает согласие результатов, полученных с помощью динамического моделирования, с результатами, полученными при аналитическом решении уравнений Смолуховского.

Список литературы

- 1 Y. Abe, C. Gregoire and H. Delagrange «Langevin approach to nuclear dissipative dynamics» // *Journal de Physique* (1986) V. 47, p. 329 – 338.
- 2 G.E. Uhlenbeck and L.S. Ornstein «On the theory of the Brownian motion» // *Physical Review* (1930) V. 36, P. 823 – 841.
- 3 S. Chandrasekhar «Stochastic problems in physics and astronomy» // *Reviews of Modern Physics* (1943) V. 15, № 1, p. 1 – 89.
- 4 H. Risken «The Fokker-Planck equation» (1984) Springer-Verlag, p 472.
- 5 H.A. Kramers «Brownian motion in a field of force and the diffusion model of chemical reaction» // *Physica* (1940) V. 7, p. 284 – 304.
- 6 N.D. Mavlitov, P. Fröbrich and I.I. Gonchar «Combining a Langevin description of heavy-ion induced fission including neutron evaporation with the statistical model» // *Zeitschrift für Physik A* (1992) V. 342, p. 195 – 198.
- 7 P. Fröbrich, I.I. Gontchar and N.D. Mavlitov «Langevin fluctuation-dissipation dynamics of hot nuclei: Precission neutron multiplicities and fission probabilities» // *Nuclear Physics A* (1993) V. 556, P. 281 – 306.
- 8 I.I. Gontchar and P. Fröbrich «Nuclear fission: combining the dynamical Langevin equation with the statistical model» // *Nuclear Physics A* (1993) V. 551, p. 495 – 507.
- 9 I.I. Gontchar, P. Fröbrich and N.I. Pischasov «Consistent dynamical and statistical description of fission of hot nuclei» // *Physical Review C* (1993) V. 47, № 5, p. 2228 – 2235.
- 10 I. Gontchar, L.A. Litnevsky and P. Fröbrich «A C-code for combining a Langevin fission dynamics of hot nuclei with a statistical model including evaporation of light particles and giant dipole – quanta» // *Computer Physics Communications* (1997) V. 107, p. 223 – 245.
- 11 P. Fröbrich and I.I. Gontchar «Langevin description of fusion, deep-inelastic collisions and heavy-ion-induced fission» // *Physics Reports* (1998) V. 292, № 3 & 4, p. 131 – 237.
- 12 L. Donadille, E. Liatard, B. Benoit, F. Hanappe, L. Stuttge, G. Rudolf, E.M. Kozulin, Yu.A. Lazarev, P. Desesquelles, L.A. Litnevsky, B. Bilwes, J.-F. Bruandet, G.J. Costa, O. Dorvaux, F. Farget, J. Fayot, G. Guillaume, A. Huck, I. Itkis, M.G. Itkis, S. Jokic, N.A. Kondratiev, F.-R. Lecolley, J.-F. Lecolley, Yu.Ts. Oganessian, G. Perrin, D. Santos, F. Schussler, S. Tomasevic, J.-B. Viano, B. Vignon «Fission dynamics for capture reactions in $58,64\text{Ni} + 208\text{Pb}$ systems: New results in terms of thermal energy and neutron multiplicity correlated distributions» // *Nuclear Physics A* (1999) V. 656 p. 259 – 283.
- 13 K. Pomorski, B. Nerlo-Pomorska, A Surowiec, M. Kowal, J. Bartel, K. Dietrich, J. Richert, C. Schmitt, B. Benoit, E. de Goes Brennard, L. Donadille, C. Badimon «Light-particle emission from the fissioning nuclei 126Ba , 188Pt and $266,272,278110$: theoretical predictions and experimental results» // *Nuclear Physics A* (2000) V. 679, p. 25 – 53.
- 14 G. Chaudhuri and S. Pal «Precission neutron multiplicity and fission probability from Langevin dynamics of nuclear fission» // *Physical Review C* (2002) V. 65, 054612.
- 15 И.И. Гончар, Н.А. Пономаренко, В.В. Туркин и Л.А. Литневский «Теоретическое исследование зависимости среднего времени деления возбуждённых атомных ядер от углового момента» // *Ядерная физика* (2004) Т. 67, № 11, с 2101 – 2115.
- 16 W. Ye «Effect of isospin on the evaporation residue cross section» // *Physical Review C* (2007) V. 76, 021604(R).
- 17 М.Н. Ёсламизаде, В.А. Дроздов, Д.О. Еременко, С. Ю. Платонов, О.В. Фотина и О.А. Юминов «A dynamical-statistical model of nuclear fission of heavy elements» // *Moscow University Physics Bulletin* (2008) V. 63, № 1, p. 24 – 27.
- 18 N. Chen and W. Ye «Roles of isospin in evaporation residue cross section as a probe of

- nuclear dissipation» // *Communication in Theoretical Physics* (2008) V. 49, № 3, p. 739 – 742.
- 19 W. Ye, H.W. Yang and F. Wu «Isospin effects on the evaporation residue spin distribution» // *Physical Review C* (2008) V. 77, 011302(R).
- 20 W. Ye «Isospin effects on neutrons as a probe of nuclear dissipation» // *Physical Review C* (2009) V. 79, 031601(R).
- 21 W. Ye «Significant role of deformation in probing postsaddle nuclear dissipation with light particle emission» // *Physical Review C* (2010) V 81, 054609.
- 22 D.V. Vanin, G.I. Kosenko and G.D. Adeev «Langevin calculation of fission fragment mass distribution in fission of excited nuclei» // *Physical Review C* (1999) V. 59, № 4, P. 2114 – 2121.
- 23 И.И. Гончар, А.Э. Геттингер, Л.В. Гурьян и В. Вагнер «Много-мерная динамическо-статистическая модель деления возбуждённых ядер» // *Ядерная физика* (2000) Т. 63, № 10, С. 1778 – 1797.
- 24 I. Gontchar, M. Morjean and S. Basnary «Nuclear dissipation from fission time» // *Euro Physics Letters* (2002) V. 57(3), P. 355 – 361.
- 25 W. Wagner, I.I. Gontchar, A.E. Gettinger, L.A. Litnevsky, H.-G. Ortlepp and D.V. Kamanin «Novel Features of the fragment mass variance in fission of hot nuclei» // *Yadernaya Fizika* (2002) V. 65, № 8, P. 1 – 8.
- 26 Y. Jia and J.-D. Bao «Calculations of the anisotropy of the fission fragment angular distribution and neutron emission multiplicities Prescission from Langevin dynamics» // *Physical Review C* (2007) V. 75, 034601.
- 27 A.V. Karpov, P.N. Nadtochy, D.V. Vanin and G.D. Adeev «Three-dimensional Langevin calculations of fission fragment mass-energy distribution from excited compound nuclei» // *Physical Review C* (2001) V. 63, 054610.
- 28 A.V. Karpov, P.N. Nadtochy, E.G. Ryabov and G.D. Adeev «Consistent application of the finite-range liquid-drop model to Langevin fission dynamics of hot rotating nuclei» // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* (2003) V. 29, p. 2365 – 2380.
- 29 Г.Д. Адеев, А.В. Карпов, П.Н. Надточий и Д.В. Ванин «Много-мерный стохастический подход к динамике деления возбуждённых ядер» // *Физика Элементарных Частиц и Атомного Ядра* (2005) Т. 36, вып. 4, с. 731 – 814.
- 30 P.N. Nadtochy, A. Kelic and K.-H. Schmidt «Fission rate in multi-dimensional Langevin calculation» // *Physical Review C* (2007) V. 75, 064614.
- 31 E.G. Ryabov, A.V. Karpov, P. N. Nadtochy and G. D. Adeev «Application of a temperature-dependent liquid-drop model to dynamical Langevin calculation of fission-fragment distribution of excited nuclei» // *Physical Review C* (2008) V. 78, 044614.
- 32 C. Schmitt, P.N. Nadtochy, A. Heinz, B. Jurado, A. Kelic and K.-H. Schmidt «First experiment on fission transient in fissile spherical nuclei produced by fragmentation of radioactive beams» // *Physical Review Letters* (2007) V. 99, 042701.
- 33 Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц «Механика» серия: «Теоретическая физика» том 1 (1988) Государственное издательство физико-математической литературы, с. 216.
- 34 O. Edholm and O. Leimar «The accuracy of Kramers' theory of chemical kinetics» // *Physica* (1979) V. 98A, p. 313 – 324.
- 35 H.C. Brinkman «Brownian motion in a field of force and the diffusion theory of chemical reactions» // *Physica* (1956) V. 22, p. 29 – 34.
- 36 N.G. van Kampen «A soluble model for diffusion in a bistable potential» // *Journal of Statistical Physics* (1977) V. 17, № 2, p. 71 – 88.
- 37 R.S. Larson and M.D. Kostin «Kramers's theory of chemical kinetics: eigenvalue and eigenfunction analysis» // *Journal of Chemical Physics* (1978) V. 69, 4821.
- 38 J.F. Gouyet and A. Bunde «Diffusion in a bistable potential at intermediate and high friction» // *Journal of Statistical Physics* (1984) V. 36, p. 43 – 64.

- 39 G.H. Weiss «Overview of theoretical models for reaction rates» // Journal of Statistical Physics (1986) V. 42, p. 3 – 36.
- 40 L. Schimansky-Geier and H. Herzel «Positive Lyapunov exponents in the Framer oscillator» // Journal of Statistical Physics (1993) V. 70, p. 141 – 147.
- 41 D.L. Stein «Critical behavior of Kramers escape rate in asymmetric classical field theories» // Journal of Statistical Physics (2004) V. 114, p. 1537 – 1556.
- 42 E. Vanden-Eijnden and M.G. Westdickenberg «Rare events in stochastic partial differential equations on large spatial domains» // Journal of Statistical Physics (2008) V. 131, p. 1023 – 1038.
- 43 N. Berglund and B. Gentz «Anomalous behavior of the Kramers rate at bifurcation in classical field theories» // <http://arxiv.org/abs/0809.2652v2>.

Н. Е. Ақтаев

Тюмень мемлекеттік университеті, Тюмень, Ресей

Қозған атом ядроларының динамикалық бөліну моделінің сәйкестігі

Аңдатпа. Жұмыста қозған атом ядроларының бөліну моделі келтірілген. Модельдің негізін лангевиннің стохастикалық дифференциалдық теңдеуі. Лангевин көзінің амплитудасы ақ шуымен сипатталады. Модельдеудің жеткіліктілігі екі жолмен тексеріледі: лангевин теңдеуінің аналитикалық шешімін гармоникалық осциллятор режиміндегі санмен салыстыру және сандық модельдеу нәтижелерін басқа авторлар алған нәтижелермен салыстыру. Екі жағдайда да динамикалық модельдеу нәтижелері жеткілікті дәлдікті қамтамасыз ететіні көрсетілген.

Түйін сөздер: атом ядросы, Лангевин теңдеулері, Эйлер әдісі, Фоккер-Планк теңдеуі, ядроның бөлінуі.

N. Aktaev

Tyumen State University, Tyumen, Russia

Adequacy of the dynamic model of fission of excited atomic nuclei

Abstract. The paper presents a model of fission of excited atomic nuclei. The model is based on the stochastic Langevin differential equation. The amplitude of the Langevin source is characterized by white noise. The adequacy of modeling is tested in two ways: by comparing the analytical solution of the Langevin equation with the numerical one in the harmonic oscillator mode and by comparing the results of numerical modeling with the results obtained by other authors. It is shown that in both cases the results of dynamic modeling provide sufficient accuracy.

Keywords: atomic nucleus, Langevin equations, Euler method, Fokker-Planck equation, nuclear fission.

References

- 1 Y. Abe, C. Gregoire and H. Delagrange «Langevin approach to nuclear dissipative dynamics» // Journal de Physique (1986) V. 47, p. 329 – 338.
- 2 G.E. Uhlenbeck and L.S. Ornstein «On the theory of the Brownian motion» // Physical Review (1930) V. 36, P. 823 – 841.
- 3 S. Chandrasekhar «Stochastic problems in physics and astronomy» // Reviews of Modern Physics (1943) V. 15, № 1, p. 1 – 89.
- 4 H. Risken «The Fokker-Planck equation» (1984) Springer-Verlag, p 472.

- 5 H.A. Kramers «Brownian motion in a field of force and the diffusion model of chemical reaction» // *Physica* (1940) V. 7, p. 284 – 304.
- 6 N.D. Mavlitov, P. Fröbrich and I.I. Gonchar «Combining a Langevin description of heavy-ion induced fission including neutron evaporation with the statistical model» // *Zeitschrift für Physik A* (1992) V. 342, p. 195 – 198.
- 7 P. Fröbrich, I.I. Gontchar and N.D. Mavlitov «Langevin fluctuation-dissipation dynamics of hot nuclei: Precission neutron multiplicities and fission probabilities» // *Nuclear Physics A* (1993) V. 556, P. 281 – 306.
- 8 I.I. Gontchar and P. Fröbrich «Nuclear fission: combining the dynamical Langevin equation with the statistical model» // *Nuclear Physics A* (1993) V. 551, p. 495 – 507.
- 9 I.I. Gontchar, P. Fröbrich and N.I. Pischasov «Consistent dynamical and statistical description of fission of hot nuclei» // *Physical Review C* (1993) V. 47, № 5, p. 2228 – 2235.
- 10 I. Gontchar, L.A. Litnevsky and P. Fröbrich «A C-code for combining a Langevin fission dynamics of hot nuclei with a statistical model including evaporation of light particles and giant dipole – quanta» // *Computer Physics Communications* (1997) V. 107, p. 223 – 245.
- 11 P. Fröbrich and I.I. Gontchar «Langevin description of fusion, deep-inelastic collisions and heavy-ion-induced fission» // *Physics Reports* (1998) V. 292, № 3 & 4, p. 131 – 237.
- 12 L. Donadille, E. Liatard, B. Benoit, F. Hanappe, L. Stuttge, G. Rudolph, E.M. Kozulin, Yu.A. Lazarev, P. Desesquelles, L.A. Litnevsky, B. Bilwes, J.-F. Bruandet, G.J. Costa, O. Dorvaux, F. Farget, J. Fayot, G. Guillaume, A. Huck, I. Itkis, M.G. Itkis, S. Jokic, N.A. Kondratiev, F.-R. Lecolley, J.-F. Lecolley, Yu.Ts. Oganessian, G. Perrin, D. Santos, F. Schussler, S. Tomasevic, J.-B. Viano, B. Vignon «Fission dynamics for capture reactions in $58,64\text{Ni} + 208\text{Pb}$ systems: New results in terms of thermal energy and neutron multiplicity correlated distributions» // *Nuclear Physics A* (1999) V. 656 p. 259 – 283.
- 13 K. Pomorski, B. Nerlo-Pomorska, A Surowiec, M. Kowal, J. Bartel, K. Dietrich, J. Richert, C. Schmitt, B. Benoit, E. de Goes Brennand, L. Donadille, C. Badimon «Light-particle emission from the fissioning nuclei 126Ba , 188Pt and $266,272,278,110$: theoretical predictions and experimental results» // *Nuclear Physics A* (2000) V. 679, p. 25 – 53.
- 14 G. Chaudhuri and S. Pal «Precission neutron multiplicity and fission probability from Langevin dynamics of nuclear fission» // *Physical Review C* (2002) V. 65, 054612.
- 15 И.И. Гончар, Н.А. Пономаренко, В.В. Туркин и Л.А. Литневский «Теоретическое исследование зависимости среднего времени деления возбуждённых атомных ядер от углового момента» // *Ядерная физика* (2004) Т. 67, № 11, с 2101 – 2115.
- 16 W. Ye «Effect of isospin on the evaporation residue cross section» // *Physical Review C* (2007) V. 76, 021604(R).
- 17 M.H. Éslamizadeh, V.A. Drozdov, D.O. Eremenko, S. Yu. Platonov, O.V. Fotina and O.A. Yuminov «A dynamical-statistical model of nuclear fission of heavy elements» // *Moscow University Physics Bulletin* (2008) V. 63, № 1, p. 24 – 27.
- 18 N. Chen and W. Ye «Roles of isospin in evaporation residue cross section as a probe of nuclear dissipation» // *Communication in Theoretical Physics* (2008) V. 49, № 3, p. 739 – 742.
- 19 W. Ye, H.W. Yang and F. Wu « Isospin effects on the evaporation residue spin distribution» // *Physical Review C* (2008) V. 77, 011302(R).
- 20 W. Ye «Isospin effects on neutrons as a probe of nuclear dissipation» // *Physical Review C* (2009) V. 79, 031601(R).
- 21 W. Ye «Significant role of deformation in probing postsaddle nuclear dissipation with light particle emission» // *Physical Review C* (2010) V 81, 054609.
- 22 D.V. Vanin, G.I. Kosenko and G.D. Adeev «Langevin calculation of fission fragment mass distribution in fission of excited nuclei» // *Physical Review C* (1999) V. 59, № 4, P. 2114 – 2121.
- 23 И.И. Гончар, А.Э. Геттингер, Л.В. Гурьян и В. Вагнер «Много-мерная динамическо-статистическая модель деления возбуждённых ядер» // *Ядерная физика* (2000) Т. 63, № 10, С. 1778 –

1797.

- 24 I. Gontchar, M. Morjean and S. Basnary «Nuclear dissipation from fission time» // *Euro Physics Letters* (2002) V. 57(3), P. 355 – 361.
- 25 W. Wagner, I.I. Gontchar, A.E. Gettinger, L.A. Litnevsky, H.-G. Ortlepp and D.V. Kamanin «Novel Features of the fragment mass variance in fission of hot nuclei» // *Yadernaya Fizika* (2002) V. 65, № 8, P. 1 – 8.
- 26 Y. Jia and J.-D. Bao «Calculations of the anisotropy of the fission fragment angular distribution and neutron emission multiplicities Prescission from Langevin dynamics» // *Physical Review C* (2007) V. 75, 034601.
- 27 A.V. Karpov, P.N. Nadtochy, D.V. Vanin and G.D. Adeev «Three-dimensional Langevin calculations of fission fragment mass-energy distribution from excited compound nuclei» // *Physical Review C* (2001) V. 63, 054610.
- 28 A.V. Karpov, P.N. Nadtochy, E.G. Ryabov and G.D. Adeev «Consistent application of the finite-range liquid-drop model to Langevin fission dynamics of hot rotating nuclei» // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* (2003) V. 29, p. 2365 – 2380.
- 29 Г.Д. Адеев, А.В. Карпов, П.Н. Надточий и Д.В. Ванин «Много-мерный стохастический подход к динамике деления возбуждённых ядер» // *Физика Элементарных Частиц и Атомного Ядра* (2005) Т. 36, вып. 4, с. 731 – 814.
- 30 P.N. Nadtochy, A. Kelic and K.-H. Schmidt «Fission rate in multi-dimensional Langevin calculation» // *Physical Review C* (2007) V. 75, 064614.
- 31 E.G. Ryabov, A.V. Karpov, P. N. Nadtochy and G. D. Adeev «Application of a temperature-dependent liquid-drop model to dynamical Langevin calculation of fission-fragment distribution of excited nuclei» // *Physical Review C* (2008) V. 78, 044614.
- 32 C. Schmitt, P.N. Nadtochy, A. Heinz, B. Jurado, A. Kelic and K.-H. Schmidt «First experiment on fission transient in fissile spherical nuclei produced by fragmentation of radioactive beams» // *Physical Review Letters* (2007) V. 99, 042701.
- 33 Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц «Механика» серия: «Теоретическая физика» том 1 (1988) Государственное издательство физико-математической литературы, с. 216.
- 34 O. Edholm and O. Leimar «The accuracy of Kramers' theory of chemical kinetics» // *Physica* (1979) V. 98A, p. 313 – 324.
- 35 H.C. Brinkman «Brownian motion in a field of force and the diffusion theory of chemical reactions» // *Physica* (1956) V. 22, p. 29 – 34.
- 36 N.G. van Kampen «A soluble model for diffusion in a bistable potential» // *Journal of Statistical Physics* (1977) V. 17, № 2, p. 71 – 88.
- 37 R.S. Larson and M.D. Kostin «Kramers's theory of chemical kinetics: eigenvalue and eigenfunction analysis» // *Journal of Chemical Physics* (1978) V. 69, 4821.
- 38 J.F. Gouyet and A. Bunde «Diffusion in a bistable potential at intermediate and high friction» // *Journal of Statistical Physics* (1984) V. 36, p. 43 – 64.
- 39 G.H. Weiss «Overview of theoretical models for reaction rates» // *Journal of Statistical Physics* (1986) V. 42, p. 3 – 36.
- 40 L. Schimansky-Geier and H. Herzel «Positive Lyapunov exponents in the Framer's oscillator» // *Journal of Statistical Physics* (1993) V. 70, p. 141 – 147.
- 41 D.L. Stein «Critical behavior of Kramers escape rate in asymmetric classical field theories» // *Journal of Statistical Physics* (2004) V. 114, p. 1537 – 1556.
- 42 E. Vanden-Eijnden and M.G. Westdickenberg «Rare events in stochastic partial differential equations on large spatial domains» // *Journal of Statistical Physics* (2008) V. 131, p. 1023 – 1038.
- 43 N. Berglund and B. Gentz «Anomalous behavior of the Kramers rate at bifurcation in classical field theories» // <http://arxiv.org/abs/0809.2652v2>.

Сведения об авторах:

Н.Е. Актаев – Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия.

Н.Е. Ақтаев – Тюмень мемлекеттік университеті, Тюмень, Ресей.

N. Aktaev – Tyumen State University, Tyumen, Russia.

Системный подход по внутрисхемной диагностике и проектированию печатных плат для локомотивов

Аннотация. В условиях микроминиатюризации радиоэлектронной аппаратуры все большую актуальность приобретают вопросы проектирования коммутационных структур. Классическим решением для коммутационной структуры функциональных модулей электронной аппаратуры (ЭА) являются многослойные печатные платы - печатные платы, состоящие из нескольких слоев диэлектрика с проводящими рисунками между слоями и на внешних сторонах. Главной задачей при проектировании многослойных печатных плат является обеспечение надежной конструкции, а также высокое качество передаваемого сигнала. Актуальность исследований обусловлена тем, что на сегодняшний день все больше электронных устройств имеют немалое количество используемых элементов и жесткие ограничения по габаритам устройства, что приводит к необходимости использования многослойных печатных плат, в том числе и в ВЧ диапазоне.

При проектировании слоев печатной платы устанавливается последовательность расположения слоев печатных дорожек; принимается решение: какие из них должны быть сплошными слоями питания и земли; учитываются величина диэлектрической проницаемости подложки и расстояние между печатными слоями; рассчитываются требуемые размеры печатных дорожек и минимальная ширина промежутков между ними. Стоит отметить и влияние выбора технологии изготовления на конструкцию многослойной печатной платы.

Ключевые слова: печатные платы, внутрисхемное тестирование, полосовой фильтр.

DOI: doi.org/10.32523/2616-6836-2022-141-4-29-40

1. Введение

1.1 Мотивация

Финальный этап создания электронного продукта — серийное производство, именно оно в конечном итоге определяет качество устройства. Пользователь не сможет оценить идеальную программную и аппаратную платформу новой электроники, если на сборочном конвейере произойдет сбой, поэтому контроль функциональности и тестирование сборки — обязательные этапы массового производства.

В общем виде процесс подготовки и тестирования электронного изделия на производстве выглядит так:

- проектирование и создание стенда для прошивки и тестирования с использованием JTAG/ICST-тестирования;
- разработка системы тестов и параметров контроля качества и приемки на производстве;
- автоматизированная или ручная проверка функциональности.

1.2 Методики и технологии реализации тестирования устройств и их отдельных частей в процессе производства

Тестирование устройства и его отдельных частей в процессе производства можно

реализовать на базе следующих методик и технологий:

1. *Визуальный автоматизированный контроль (AOI, AXI)* — это предварительная проверка качества, которая используется на любом контрактном производстве, она проходит на разных стадиях монтажа печатных плат, в том числе с использованием рентгеновского излучения для проверки невидимых глазу или стандартным оптическим системам мест показан на рисунке 1.

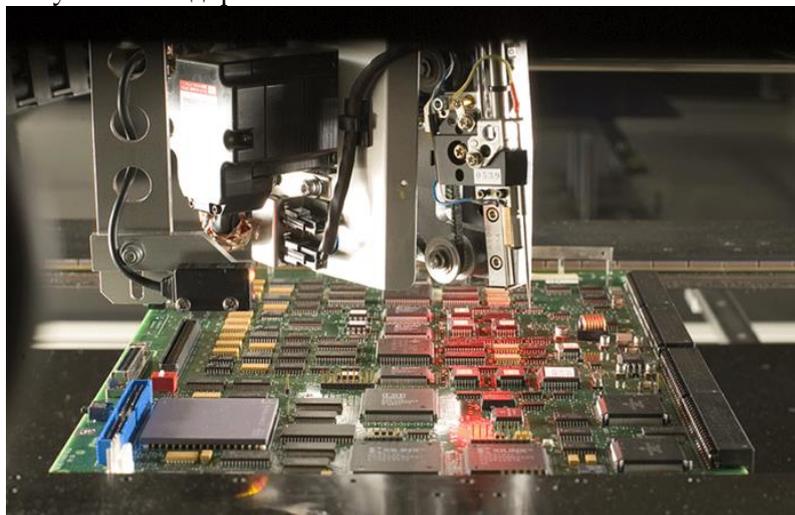


Рисунок 1. Печатная плата проходит визуальный автоматизированный контроль (АОИ). По результатам проверки отображаются данные по обнаруженным дефектам

2. *Внутрисхемное тестирование (ICT/FICT)* – проверка соединений и компонентов на печатной плате, анализ электрических параметров всей схемы либо отдельных ее участков.

Данный метод использует контакт пробников с узлами собранной платы, это может быть, как стационарное поле контактов («ложе гвоздей», англ. – bedofnails), так и «летающие щупы» (flyingprobe) или «летающие матрицы» представлен на рисунке 2. Часто требует использования сложного и дорогостоящего оборудования, технологической подготовки, изготовления специальной оснастки.

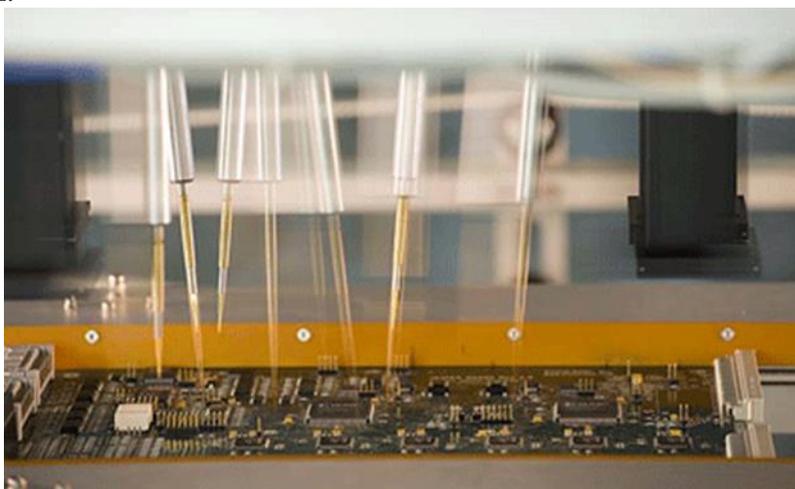


Рисунок 2. Тестирование печатной платы «летающими щупами» (flyingprobes)

3. *Периферийное/граничное сканирование (boundaryscan)* — тестирование с использованием JTAG, которое основано на использовании в микросхемах поддержки стандарта IEEE 1149.

4. *Функциональное тестирование (FCT)* — проверка собранных или частично собранных устройств на выполнение заданной функциональности и на соответствие параметрам, которые заложены в спецификации на прибор.

1.3 Оценка методик и технологий реализации тестирования устройств и их отдельных частей в процессе производства

Все перечисленные методики позволяют оценить качество элементов электроники в процессе производства, однако в некоторых случаях тестирование устройства проводится только на финальном этапе. Это так называемое тестирование после окончательной сборки (EOL) — проверка функциональности и соответствия спецификации. Оценивается не только качество, но также стабильность и надежность устройства. Такой анализ узлов электронных изделий проходит с использованием сложного стендового оборудования, которое имитирует систему, в составе которой работает тестируемое устройство. Если по результатам такой проверки процент брака превышает предварительную оценку, тогда корректируется технология производства и запускается очередная пробная партия устройств. И так в несколько итераций.

На практике лучшие результаты показывают те методики, которые используются в процессе производства, т.е. функциональное и внутрисхемное тестирование, т.к. они позволяют оперативно получить информацию и определить конкретные этапы, на которых появляются проблемы. Благодаря этому можно внести корректировки в производственный процесс еще до окончательной сборки устройства.

Внутрисхемный контроль даёт возможность оценить ряд важнейших параметров собранного печатного узла, в том числе локализовать дефекты, не обнаруживаемые при других видах контроля.

Проведение внутрисхемного контроля является крайне желательным перед этапами наладки и функционального контроля собранного печатного узла, поскольку позволяет исключить проблему поиска и устранения производственных дефектов, на что, по статистике, уходит до 90% времени наладчика. Сэкономленные таким образом ресурсы производитель имеет возможность направить на дополнительные операции по обеспечению максимально высокого качества выпускаемой продукции.

2. Методы

Внутрисхемный контроль означает проверку отдельных компонентов на плате, причем при тестировании компонента исключается влияние параллельных цепей. Внутрисхемный контроль подразделяется на аналоговый и цифровой. При аналоговом контроле обычно проверяются: наличие коротких замыканий и обрывов, номиналы дискретных компонентов, наличие и правильность установки микросхем. При цифровом внутрисхемном контроле проверяются цифровые микросхемы на соответствие таблице истинности.

Функциональный контроль проверяет работоспособность изделия в сборе, при этом выполняются следующие задачи:

- подача питающего напряжения с возможностью изменения его в автоматическом режиме от минимально до максимально допустимого для данного изделия;
- подача цифровых и аналоговых входных сигналов в широком диапазоне частот и напряжений;
- измерение параметров выходных сигналов;
- эмуляция нагрузок;
- обмен данными между тестером и тестируемым устройством;
- обработка результатов измерений и вывод их на монитор и принтер в удобном для пользователя виде;
- накопление и обработка статистической информации.

При функциональном контроле контакт с изделием осуществляется, как правило, через краевой соединитель.

Раннее обнаружение дефектов повышает эффективность производства печатных плат и

снижает накладные расходы. Для многих промежуточных стадий технологического процесса основным является оптический контроль.

Технология внутрисхемного тестирования (In-Circuit Testing, ICT), непосредственная предшественница JTAG, практически обладала монополией в тестировании электронных ПП с конца 1970-х гг. и с неизменным успехом применяется до настоящего времени, хотя и с определенными ограничениями. Доступ тестера ко внутренним цепям ПП осуществляется при помощи контактных игловок, прижимаемых адаптером тестера к поверхности ПП. На ранних этапах такие адаптеры назывались «ложе из гвоздей» (bedofnails), но сегодня это название совершенно устарело и не используется, уступив место термину «игольчатый адаптер». Поскольку в последней трети прошлого века корпуса DIP доминировали при производстве ИС, любой ее вывод был доступен для игловок адаптера с нижней (а зачастую и с верхней) стороны ПП, так что проблемы физического внутрисхемного доступа к цепям ПП практически не существовало.

С началом широкого распространения технологии поверхностного монтажа и миниатюризации ИС компоненты стали монтироваться на ПП без сквозных отверстий и с обеих сторон ПП. При этом сразу же возникла проблема размещения контактных площадок для игловок тестера ICT, а также проблема постоянного уменьшения их диаметра в условиях высокой плотности монтажа элементов с обеих сторон ПП. Вдобавок к этому, в многослойных ПП значительное число цепей схемы оставалось во внутренних слоях, так что вывод их на поверхность ПП для подключения к контактным площадкам для игловок значительно усложнял разводку платы. Все это обусловило сокращение доступа ко внутренним цепям схемы со стороны тестера ICT, что, однако, не привело к значительному сокращению применимости таких тестеров, а лишь несколько переставило акценты в областях их применения.

Компьютерное моделирование физических явлений, систем и устройств является наиболее удобным и эффективным способом организации лабораторной мастерской. По сравнению с реальными лабораторными стендами, виртуальные стенды имеют ряд существенных преимуществ:

1. отсутствие громоздкой контрольно-измерительной аппаратуры и макетов исследуемых схем;
2. малая погрешность измерений;
3. время, затрачиваемое на компьютерное моделирование, несравненно меньше времени, расходуемого на изготовление макета и выполнения его экспериментального исследования.

Значительная часть прикладных компьютерных пакетов специально разработана для решения задач проектирования электронных компонентов.

3. Результаты применения методик

Применение методов моделирования для разработки полосового фильтра Баттерворта 3-го порядка на пассивных элементах L, CCL-диапазона (от 1 ГГц до 2 ГГц).

3.1 Аналитический метод (расчеты)

Предположим, что нам нужно разработать полосовой фильтр с частотами $f_1 = 1240$ МГц и $f_2 = 1300$ МГц на уровне -3 дБ и с минимальной аттенюацией -30 дБ на частотах 1200 МГц и 1340 МГц. Также предположим, что импеданс источника и нагрузки фильтра одинаковые — 50 Ом каждый, и требуется АЧХ типа Баттерворта. Поскольку отношение $f_2/f_1 < 1,5$, т. е. меньше 1,5, нам требуется узкополосный полосовой фильтр. Первый шаг в процедуре разработки узкополосного полосового фильтра — это выполнить нормирование полосовых требований. Сначала определим геометрическую центральную частоту:

$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2} = \sqrt{1240 \times 1300 \times 10^6} = 1270 \text{ МГц}$$

Где

f_0 – геометрическая центральная частота;

f_1 – нижняя частота среза;

f_2 – верхняя частота среза.

Далее вычислим две пары геометрически связанных частот режекции, используя следующие формулы:

$$f_a f_b = f_0^2; \quad (2)$$

$$f_a = 1200 \text{ МГц} \quad f_b = \frac{f_0^2}{f_a} = \frac{(1270 \times 10^6)^2}{1200 \times 10^6} = 1344 \text{ МГц} \quad (3)$$

$$f_b - f_a = 144 \text{ МГц} \quad (4)$$

$$f_b = 1340 \text{ МГц} \quad f_a = \frac{f_0^2}{f_b} = \frac{(1270 \times 10^6)^2}{1340 \times 10^6} = 1203 \text{ МГц} \quad (5)$$

$$f_a - f_b = 137 \text{ МГц} \quad (6)$$

где

f_0 – геометрическая центральная частота;

f_a – нижняя геометрически связанная частота режекции;

f_b – верхняя геометрически связанная частота режекции.

Ситуация несколько запутанная. В частности, для каждой пары частот режекции получены две новые пары, что является результатом геометрической связи параметров фильтра по отношению к частоте f_0 . Решением будет выбрать пару с меньшим разносом в 137 МГц, что представляет более строгое требование.

Коэффициент крутизны спада данного полосового фильтра определяется по формуле:

$$A_k = \frac{\text{полоса режекции}}{\text{полоса 3 дБ}} = \frac{137 \text{ МГц}}{60 \text{ МГц}} = 2,283 \quad (7)$$

где

A_k – коэффициент крутизны.

Теперь нужно выбрать кривую Баттерворта частотной характеристики фильтра, которая обеспечивает, по крайней мере, аттенюацию -20 дБ. Такой кривой будет кривая с $n = 3$. На следующем шаге надо создать нормированный низкочастотный фильтр 3-го порядка n -типа, используя параметры. Далее импедансы и частота полученного нормированного низкочастотного фильтра масштабируют, чтобы получить импеданс 50 Ом и частоту на уровне -3 дБ, равную требуемой полосе пропускания полосового фильтра ($\Delta f_{\text{пп}} = f_2 - f_1$), которая для данного примера составляет 60 МГц. Обратите внимание на прием для масштабирования частоты! Вычисления для масштабирования выглядят таким образом:

$$C_{1(\text{действ})} = \frac{C_{1(\text{табл})}}{2\pi(\Delta f_{\text{пп}})R_L} = \frac{0,618 \text{ Ф}}{2\pi(60 \times 10^6)50} = 32,8 \text{ пФ} \quad (8)$$

$$C_{3(\text{действ})} = \frac{C_{3(\text{табл})}}{2\pi(\Delta f_{\text{пп}})R_L} = \frac{1 \text{ Ф}}{2\pi(60 \times 10^6)50} = 106,5 \text{ пФ} \quad (9)$$

$$C_{5(\text{действ})} = \frac{C_{5(\text{табл})}}{2\pi(\Delta f_{\text{пп}})R_L} = \frac{0,618 \text{ Ф}}{2\pi(60 \times 10^6)50} = 32,8 \text{ пФ} \quad (10)$$

$$L_{2(\text{действ})} = \frac{L_{2(\text{табл})}R_L}{2\pi(\Delta f_{\text{пп}})} = \frac{1,618 \times 50}{2\pi \times 60 \times 10^6} = 216 \text{ нГн} \quad (11)$$

$$L_{4(\text{действ})} = \frac{L_{4(\text{табл})}R_L}{2\pi(\Delta f_{\text{пп}})} = \frac{1,618 \times 50}{2\pi \times 60 \times 10^6} = 216 \text{ нГн} \quad (12)$$

где

$C_{1(\text{действ})}, C_{3(\text{действ})}$ – действительные значения конденсторов;

$C_{1(\text{табл})}, C_{3(\text{табл})}$ – табличные значения конденсаторов;

$L_{2(\text{действ})}$ – действительное значение катушки индуктивности;

$L_{2(\text{табл})}$ – табличное значение катушки индуктивности;

$\Delta f_{\text{пп}}$ – требуемая полоса пропускания;

R_L – сопротивление.

Принципиальная схема фильтра с результатами масштабирования показана на рисунке 3, а.

А теперь идет самый важный этап разработки. Каждую ветвь низкочастотного фильтра нужно настроить в резонанс с центральной частотой f_0 , добавив к каждому индуктору последовательный конденсатор и к каждому конденсатору параллельный индуктор. Значения дополнительных компонентов определяют, используя уравнение резонансного LC-контура:

$$L_{(\text{пар } C_1)} = \frac{1}{(1\pi f_0)^2 C_{1(\text{действ})}} = \frac{1}{(1\pi \times 1270 \times 10^6)^2 \times 32,8 \times 10^{-12}} = 1,91 \text{ нГн} \quad (13)$$

$$L_{(\text{пар } C_5)} = \frac{1}{(1\pi f_0)^2 C_{5(\text{действ})}} = \frac{1}{(1\pi \times 1270 \times 10^6)^2 \times 32,8 \times 10^{-12}} = 1,91 \text{ нГн} \quad (14)$$

$$L_{(\text{пар } C_3)} = \frac{1}{(1\pi f_0)^2 C_{3(\text{действ})}} = \frac{1}{(1\pi \times 1270 \times 10^6)^2 \times 106,15 \times 10^{-12}} = 0,6 \text{ нГн} \quad (15)$$

$$C_{(\text{послед } L_2)} = \frac{1}{(1\pi f_0)^2 L_{2(\text{действ})}} = \frac{1}{(1\pi \times 1270 \times 10^6)^2 \times 216 \times 10^{-9}} = 0,291 \text{ нФ} \quad (16)$$

$$C_{(\text{послед } L_4)} = \frac{1}{(1\pi f_0)^2 L_{4(\text{действ})}} = \frac{1}{(1\pi \times 1270 \times 10^6)^2 \times 216 \times 10^{-9}} = \quad (17)$$

$$= 0,291 \text{ нФ}$$

где $L_{(\text{пар } C_1)}, L_{(\text{пар } C_3)}, L_{(\text{пар } C_5)}$ – значение катушки индуктивности, параллельно расположенных конденсатору;

$C_{(\text{послед } L_2)}, C_{(\text{послед } L_4)}$ – значение конденсатора, последовательно соединенного с катушкой индуктивности.

3.2 Схемотехнический метод

Конечная версия принципиальной схемы узкополосного полосового низкочастотного фильтра показана на рисунке 3, а.

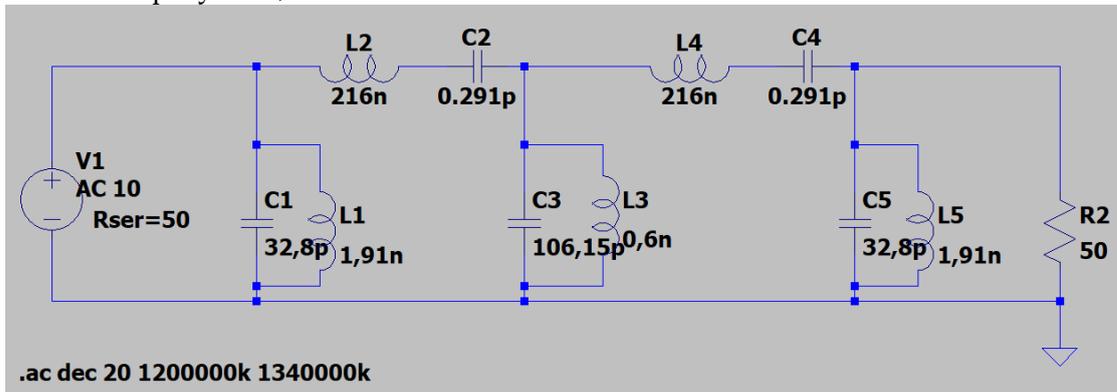


Рисунок 3, а - принципиальная схема узкополосного полосового низкочастотного фильтра

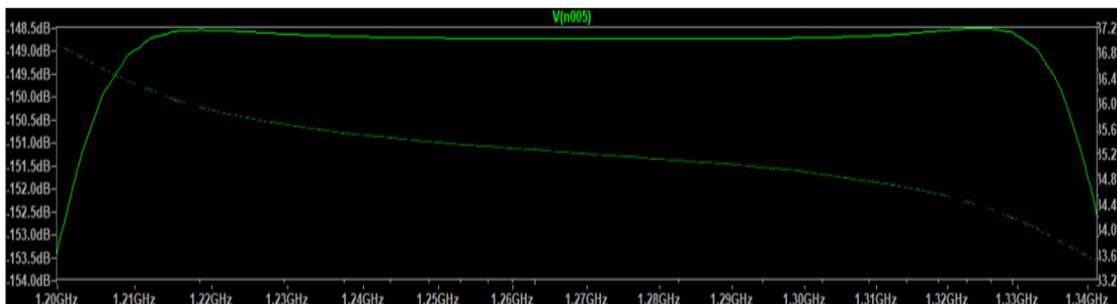
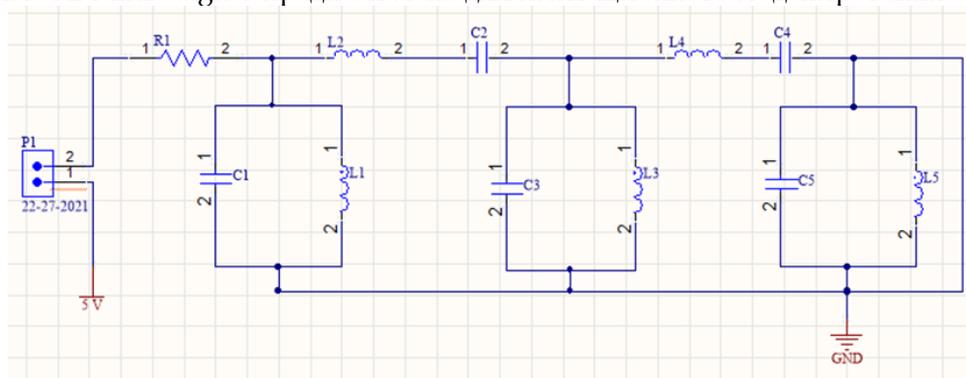


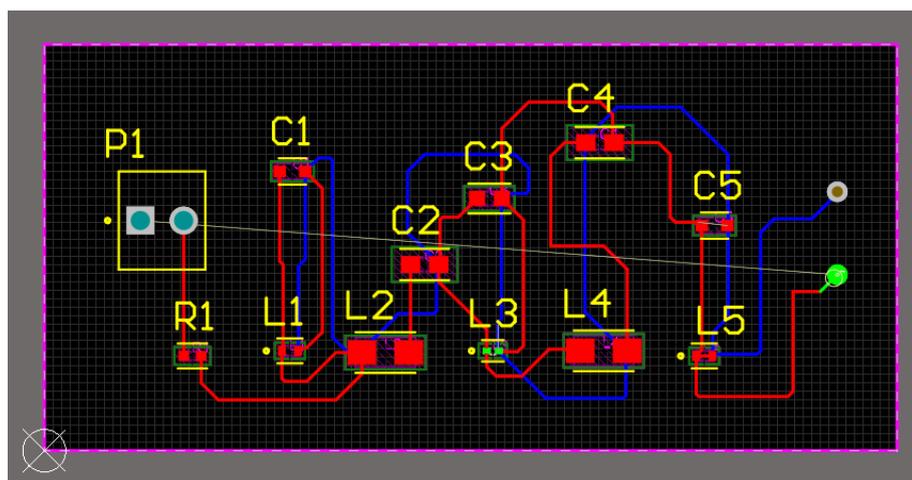
Рисунок 3, б - полосовой фильтр Баттерворта 5-го порядка на пассивных элементах L, CL-диапазона в программном обеспечении LTSpice 17

Рассчитав все компоненты для нашего полосового фильтра, а также получив его АЧХ, приступим к следующему методу моделирования.

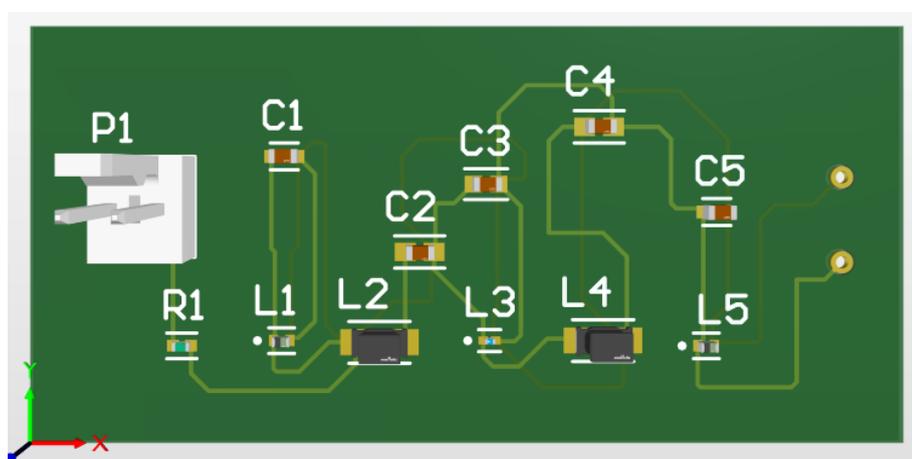
3.3 Имитационный метод (система автоматизированного проектирования (САПР)) Программа AltiumDesigner предназначена для имитационного моделирования.



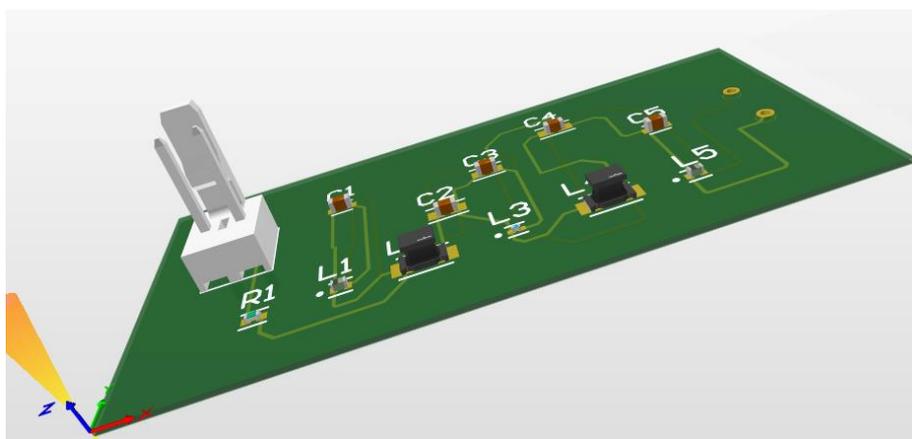
а) схемная реализация;



б) создание РСВ (печатная плата);



в) 3D-модель печатной платы;



г) 3D-модель печатной платы

Рисунок 4. Полосовой фильтр Баттерворта 5-го порядка на пассивных элементах L, C L-диапазона

4. Выводы

По результатам всех технологических операций получаем высококачественную многослойную печатную плату, в которой минимизированы негативные влияния шины питания, внешних наводок и сигнальных проводников друг на друга. Предлагаемая методика направлена на

решения проблем неоптимального использования ресурсов, которые в первую очередь сказываются на увеличении издержек предприятия, качестве рабочего процесса и выпускаемого продукта. Она полностью удовлетворяет требованиям концепции "Бережливого производства" и позволяет минимизировать потери на каждом этапе производственного процесса, тем самым существенно улучшив экономические показатели предприятия. Залогом успешности современного производства является постоянное сокращение издержек, улучшение качества продукции и непрерывное совершенствование процессов.

По результатам анализа методов проектирования многослойных печатных плат можно констатировать, что:

- при анализе требуемых параметров определяются важные числовые характеристики, без которых можно сильно проиграть не только в качестве и габаритных размерах, но и в себестоимости печатной платы;
- проводя трассировку проводников, проанализировав перед этим влияние проводников между собой, можно повысить качество характеристик передачи сигнала;
- использование классических вариантов укладки слоев дает возможность получать шаблон при проектировании многослойных печатных плат для различных устройств со схожими требованиями.

В итоге можно отметить, что предлагаемая методика приводит к получению на выходе высококачественных многослойных печатных плат с низкой себестоимостью.

Список литературы

1. Мазепова О. И., Мещанов В. П., Прохорова Н. И., Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р./Под ред. А. Л. Фельдштейна. Справочник по элементам полосковой техники – М.: Связь, 1917. – с. 1-30
2. Голубев В. И., Ковалев И. С., Кузнецов Е. Г. Конструирование и расчет полосковых устройств. – М.: Сов. радио, 1974. – с. 20-47
3. Малорацкий А. Г., Явич Л.Р. Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях. – М.: Советское радио, 1972. – с. 1-15
4. Полосковые платы и узлы. Проектирование и изготовление /Под ред. Е.П. Котова и В.Д. Каплуна. – М.: Советское радио, 1979. – с. 1-5
5. Баскаков, С. И. Радио/технические цепи и сигналы. - М.: Высшая школа, 2000. – с. 462
6. Хоровиц Пауль, Хилл Уинфилд. Искусство схемотехники Том 1. – М.: Мир, 1993. – с. 1 - 120.
7. Хоровиц Пауль, Хилл Уинфилд. Искусство схемотехники Том 2. – М.: Мир, 1993. – с. 1 – 125.
8. Хоровиц Пауль, Хилл Уинфилд. Искусство схемотехники Том 3. – М.: Мир, 1993. – с.
9. Электроника. Теория и практика – 4-е изд.: Пер. с англ. / Саймон Монк, Пауль Шерц. – СПб.: БХВ-Петербург, 2018. – с. 250-270, 387-425.
10. Куцко Т. Ю. Расчет полосковых фильтров. – М.: Энергия, 1986
11. Г. Л. Маттей, Л. Янг, Е. М. Т. Джонс, Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи, М, Связь, 1971 г. – с. 26-49.
12. Л. Г. Малорацкий, Л. Р. Явич, Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях, М, Сов. радио, 1972 г.
13. Проектирование радиоприемных устройств. Под ред. А. П. Сиверса, М, Сов. радио, 1970 г. – с. 178-193.
14. Гришенцев А.Ю. Электрические фильтры. Моделирование. Применение для защиты двухпроводных линий /учебное пособие. - СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – с. 39-41.
15. Расчет электронных схем. Примеры и задачи: учеб. Пособие для вузов по спец. электрон. технике. / Г.И. Изъюров, Г.В.Королев и др.- М.: Высшая школа, 2007. – с. 355.

16. В. Х. Осадченко, Я. Ю. Волкова, Ю. А. Кандрин. Фильтры высоких и низких частот. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – с. 62-71.
17. Основы теории цепей: Учеб. для вузов /Г.В.Зевеке, П.А.Ионкин, А.В.Нетушил, С.В.Страхов. –5-е изд., перераб. –М.: Энергоатомиздат, 1989. – с. 528
18. Каплянский А. Е. и др. Электрические основы электротехники. Изд. 2-е. Учеб. пособие для электротехнических и энергетических специальностей вузов. -М.: Высш. шк., 1972. – с. 448.
19. Комаров В. В., Бушанский С. К. СВЧ-фильтры на объемных концентрических резонаторах // Радиотехника. 2018. № 8. - с. 140–143.
20. Шаров Г. А. Волноводные устройства сантиметровых и миллиметровых волн. М.: Горячая Линия – Телеком, 2016. – с. 640.
21. Проектирование печатных плат в САПР Altium Designer: сборник лабораторных работ / М. Я. Мактас, И. М. Бекмухаметов (в 2 ч. ч. 1). – Ульяновск: УлГТУ, 2014. – с. 429.
22. LTspice: компьютерное моделирование электронных схем. – СПб: БХВ-Петербург, 2010. – с. 127.

Н.Х. Назиркулов, Н.А. Бурамбаева

Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Локомотивтерге арналған схемаішілік диагностика және баспалық платаларды жобалау бойынша жүйелік тәсіл

Аңдатпа. Радиоэлектрондық аппаратураны микроминиатюризациялау жағдайында коммутациялық құрылымдарды жобалау мәселелері өзекті бола түсуде. Электрондық аппаратураның (ЭА) функционалдық модульдерінің коммутациялық құрылымына арналған классикалық шешім көп қабатты баспалық платалар – қабаттар арасында және сыртқы жағында өткізгіш сызбалары бар диэлектриктің бірнеше қабаттарынан тұратын баспалық платалар болып табылады. Көп қабатты баспалық платалар жобалаудағы басты міндет – сенімді дизайнды қамтамасыз ету, сондай-ақ берілетін сигналдың жоғары сапасы. Зерттеулердің өзектілігі бүгінгі күні көптеген электронды құрылыстарда қолданылатын элементтердің едәуір саны және құрылымының өлшемдеріне қатаң шектеулер бар, бұл көп қабатты баспалық платалар, соның ішінде жж диапазонында пайдалану қажеттілігіне әкеледі.

Баспа платасының қабаттарын жобалау кезінде баспа жолдарының қабаттарының орналасу реттілігі белгіленеді; шешім қабылданады: олардың қайсысы үздіксіз қуат және жер қабаттары болуы керек; субстраттың диэлектрик өткізгіштігінің мөлшері және баспа қабаттары арасындағы қашықтық ескеріледі; баспа жолдарының қажетті өлшемдері және олардың арасындағы саңылаулардың ең аз ені есептеледі. Өндіріс технологиясын таңдаудың көп қабатты баспалық платалар дизайнына әсерін атап өткен жөн.

Түйін сөздер: баспалық платалар, схема ішіндегі тестілеу, жолақты сүзгі.

N. Nazirkulov, N. Burambaeva

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

A systematic approach to in-circuit diagnostics and design of printed circuit boards for locomotives

Abstract. In the conditions of microminiaturization of electronic equipment, the issues of design of switching structures are becoming increasingly relevant. The classic solution for the switching structure of functional modules of electronic equipment (EE) are multilayer printed circuit boards - printed circuit boards consisting of several layers of dielectric with conductive patterns between the layers and on the

outer sides. The main task in the design of multilayer printed circuit boards is to ensure a reliable design, as well as high quality of the transmitted signal. The relevance of research is due to the fact that today more and more electronic devices have a considerable number of elements used and strict restrictions on the dimensions of the device, which leads to the need to use multilayer printed circuit boards, including in the RF range.

When designing the layers of the printed circuit board, the sequence of the arrangement of the layers of the printed tracks is established; a decision is made: which of them should be solid layers of power and earth; the value of the dielectric constant of the substrate and the distance between the printed layers are taken into account; the required dimensions of the printed tracks and the minimum width of the gaps between them are calculated. It is worth noting the influence of the choice of manufacturing technology on the design of a multilayer printed circuit board.

Keywords: printed circuit boards, in-circuit testing, bandpass filter.

References

1. Mazepova O. I., Meshchanov V. P., Prokhorova N. I., Feldstein A. L., Yavich L. P./Edited by A. L. Feldstein. Handbook on the elements of strip technology – M.: Svyaz, 1917. – p. 1-30.
2. Golubev V. I., Kovalev I. S., Kuznetsov E. G. Design and calculation of strip devices. – M.: Sov. radio, 1974. – p. 20-47.
3. Maloradsky A. G., Yavich L.R. Design and calculation of microwave elements on strip lines. – Moscow: Sovetskoe radio, 1972. – p. 1-15.
4. Strip boards and nodes. Designing and manufacturing / Ed. by E.P. Kotov and V.D. Kaplun. – M.: Sovetskoe Radio, 1979. – p. 1-5.
5. Baskakov, S. I. Radio/technical circuits and signals. - M.: Higher School, 2000. – p. 462.
6. Horowitz Paul, Hill Winfield. The Art of circuit Engineering Volume 1. – Moscow: Mir, 1993. – p. 1 - 120.
7. Horowitz Paul, Hill Winfield. The Art of circuit Engineering Volume 2. – Moscow: Mir, 1993. – p. 1 – 125.
8. Horowitz Paul, Hill Winfield. The Art of circuit engineering Volume 3. – Moscow: Mir, 1993. – p. 216-220.
9. Electronics. Theory and practice — 4th ed.: Translated from English / Simon Monk, Paul Scherz. — St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2018. – p. 250-270, 387-425.
10. Kutsko T. Yu. Calculation of bandpass filters. – M.: Energy, 1986
11. G. L. Mattei, L. Yang, E. M. T. Jones, Microwave filters, matching circuits and communication circuits, M, Svyaz, 1971 – p. 26-49.
12. L. G. Maloratsky, L. R. Yavich, Design and calculation of microwave elements on strip lines, M, Sov. radio, 1972.
13. Design of radio receiving devices. Edited by A. P. Sievers, M, Soviet Radio, 1970 – p. 178-193.
14. Grishentsev A.Yu. Electric filters. Modeling. Application for the protection of two-wire lines / tutorial. - St. Petersburg: St. Petersburg State University ITMO, 2009. – p. 39-41.
15. Calculation of electronic circuits. Examples and tasks: studies. Manual for universities on spec. electron. technology. / G.I. Izzyurov, G.V. Korolev et al. - M.: Higher School, 2007. – p. 355.
16. V. H. Osadchenko, Ya. Yu. Volkova, Yu. A. Kandrina. Filters of high and low frequencies. - Yekaterinburg: Ural Publishing House. un-ta, 2015. – p. 62-71.
17. Fundamentals of the theory of circuits: Studies for universities /G.V.Zeveke, P.A.Ionkin, A.V.Netushil, S.V.Strakhov. -5th ed., reprint –M.: Energoatomizdat, 1989. – p. 528
18. Kaplyansky A. E. et al. Electrical fundamentals of electrical engineering. 2nd ed. Textbook for electrotechnical and energy specialties of universities. - M.: Higher School, 1972. – p. 448.

19. Komarov V. V., Bushansky S. K. Microwave filters on volumetric concentric resonators // Radio Engineering. 2018. No. 8. - p. 140-143.
20. Sharov G. A. Waveguide devices of centimeter and millimeter waves. M.: Hotline – Telecom, 2016. – p. 640.
21. Design of printed circuit boards in CAD Altium Designer: collection of laboratory works / M. Ya. Maktas, I. M. Bekmukhametov (in 2 h. h. 1). – Ulyanovsk: UISTU, 2014. – p. 429.
22. LTspice: computer modeling of electronic circuits. – St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2010. – p. 127.

Сведения об авторах:

Назиркулов Н.Х. – магистрант 1 курса кафедры радиотехника, электроника и телекоммуникации, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан.

Бурамбаева Н.А. – заведующая кафедрой радиотехники, электроники и телекоммуникации, кандидат технических наук, профессор кафедры радиотехника, электроника и телекоммуникации, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан.

Назиркулов Н. Х. – радиотехника, электроника және телекоммуникация кафедрасының 1 курс магистранты, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті., Қажымұқан көшесі, 13, Астана, Қазақстан.

Бурамбаева Н.А. – Радиотехника, электроника және телекоммуникация кафедрасының меңгерушісі, техника ғылымдарының кандидаты, радиотехника, электроника және телекоммуникация кафедрасының профессоры, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті., Қажымұқан көшесі, 13, Астана, Қазақстан.

N. Nodirbek – 1st year master's student of the Department of Radio Engineering, Electronics and Telecommunications, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan str., 13, Astana, Kazakhstan.

N. Burambaeva – Head of the Department of Radio Engineering, Electronics and Telecommunications, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Radio Engineering, Electronics and Telecommunications, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan str., 13, Astana, Kazakhstan.

Ж.Б. Ергожина^{1,2}, А.Б. Касымов¹, Г.Н. Байтанатова², Г.А. Баймуханова²

¹НАО "Университет имени Шакарима города Семей", Семей, Казахстан

²КГП на ПХВ "Павлодарский областной онкологический диспансер", Павлодар, Казахстан
(E-mail: zhbeisekeevna@mail.ru)

Контроль качества планов с модуляцией интенсивности (volumetric modulated arc therapy - vmat) в лучевой терапии на линейном ускорителе vitalbeam

Аннотация. Показана значимость методов медицинской физики в современной лучевой терапии. Рассмотрены виды облучения, используемые в лучевой терапии. На каждом этапе необходимо соблюдение высокой точности всех процедур. Одним из значительных этапов является планирование облучения, где для точности облучения пациента проводится контроль качества плана.

Представлен процесс контроля качества планов облучения в лучевой терапии с модуляцией интенсивности (Volumetric Modulated Arc Therapy - VMAT) на линейном ускорителе VitalBeam. Рассмотрен метод контроля качества на портальном детекторе (Electronic Portal Imaging Device, EPID) плана лучевой терапии с модуляцией интенсивности (Volumetric Modulated Arc Therapy - VMAT). Сравнение распределения дозы, то есть наложение дозы друг на друга контуров распределения. Представлены изодозные линии и гистограмма доза-объем для плана с модуляцией интенсивности и описаны основные размерные геометрии, используемые в клинической практике для дозиметрического обследования планов облучения.

Определен гамма-анализ плана с модуляцией интенсивности (VMAT) и критерии гамма-анализа. А также представлено покрытие физического объема облучения. Оценен контроль качества дозиметрических распределений плана лечения с модуляцией интенсивности (VMAT) на линейном ускорителе VitalBeam.

Ключевые слова: медицинская физика, лучевая терапия, линейный ускоритель VitalBeam, Volumetric Modulated Arc Therapy - VMAT, контроль качества, гамма-анализ.

DOI: doi.org/10.32523/2616-6836-2022-141-4-41-47

1. Введение

В лучевой терапии для проведения дозиметрии, планирования лечения, контроля качества, выбора оборудования, ввода в эксплуатацию оборудования, гарантии качества, калибровки и радиационной безопасности медицинская физика играют важную роль.

В настоящее время в Республике Казахстан широко используется один из передовых методов лучевой терапии - ротационное объемно-модулированное облучение (Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT). Данный вид облучения реализуется с применением линейного ускорителя. Данный метод представляет собой движение головки аппарата во время процедуры, которая ротационно крутится вокруг пациента с использованием одной или нескольких арок.

С помощью этого метода (Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT) сокращается время лечения, обеспечивает высококонформное распределение дозы в облучаемой мишени [1,2]. Данный современный метод лучевой терапии требует высококачественного, комплексного и точного контроля качества. Для точного контроля качества в лучевой терапии используются многочисленные способы.

2. Методы

На линейном ускорителе для проверки планов лечения используется высокоточные способы контроля качества, такие как, проверка плана с использованием полупроводникового детектора, матрицы детекторов, пленок в плоскости и ионизационной камеры [3].

На линейном ускорителе VitalBeam широко применяется контроль качества плана с использованием электронного устройства портальной дозиметрии (Electronic Portal Imaging Device, EPID).

Перед облучением пациента необходимо проверить план лечения в лучевой терапии. Для этого применяется контроль качества плана лечения портальной дозиметрией (Electronic Portal Imaging Device, EPID).

Принцип работы заключается в том, что необходимо сопоставить дозовое распределение и выявить несоответствия. Самым действенным способом сравнения является сопоставление полученных кривых друг на друга. Данный анализ является быстрым и качественным методом. В данной статье представлен используемый в лучевой терапии метод контроля качества – портальная дозиметрия EPID.

С помощью портальной дозиметрии для контроля качества индивидуальных планов использован гамма-анализ, где сравниваются полученные кривые.

Сущность метода: согласование полученных кривых между собой в должной степени и анализ совпадений полученных кривых друг с другом. Если полученные кривые не соответствуют, то они будут разделены непосредственно по значению. Эти значения зависят от определённых факторов. Данные факторы представляют собой разное численное значение кривых и разность градиента доз.

Если кривые имеют крутой градиент, то сместятся незначительно. Даже если численное значение кривой велико. Если сравнительная кривая дает резкий спад дозы, то численное различие имеет наименьшую информацию. Относительно друг друга при значительном смещении должна быть высокая разность в полученных кривых. Если измеренных значениях небольшие различия, то даже они сильно сместят полученные кривые в области слабого градиента [4,5]. Места пересечения или наложения кривых являются единственным местом, где полученные кривые предоставляют точную информацию. Сравнительные кривые имеющие одинаковые распределения совпадают точно в том же месте.

3. Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлен (VMAT) план с модуляцией интенсивности в лучевой терапии на линейном ускорителе VitalBeam.

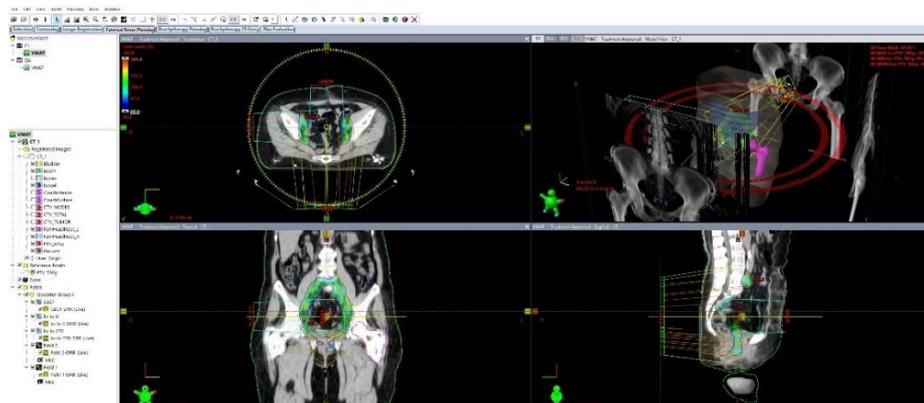


Рисунок 1. Изодозные линии плана лечения с модуляцией интенсивности (VMAT)

Также на рисунке 2 показан план лечения с модуляцией интенсивности (VMAT) с видом 3D,

где можно увидеть изодозное распределение в трехмерном изображении.



Рисунок 2. План лечения с модуляцией интенсивности (VMAT) с видом 3D

На рисунке 3 получена гистограмма доза-объем DVH плана лечения с модуляцией интенсивности (VMAT). В гистограмме доза-объем можно прочесть покрытие PTV и допустимые дозы на критические органы.

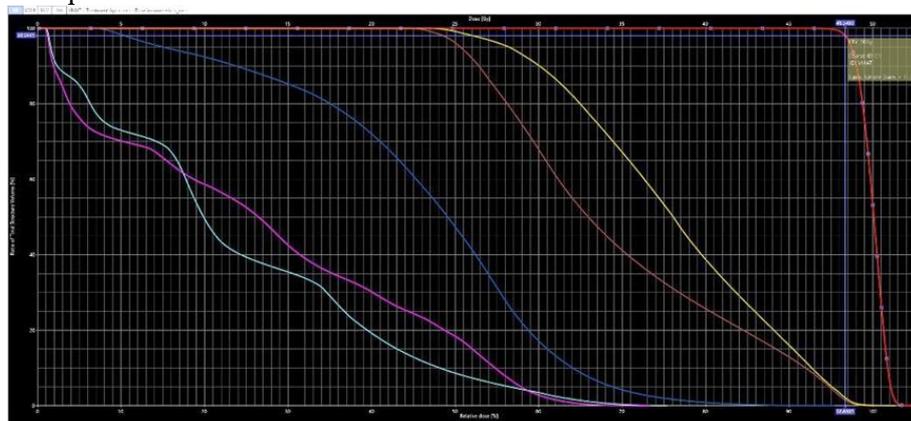


Рисунок 3. Гистограмма доза-объем DVH плана лечения с модуляцией интенсивности (VMAT)

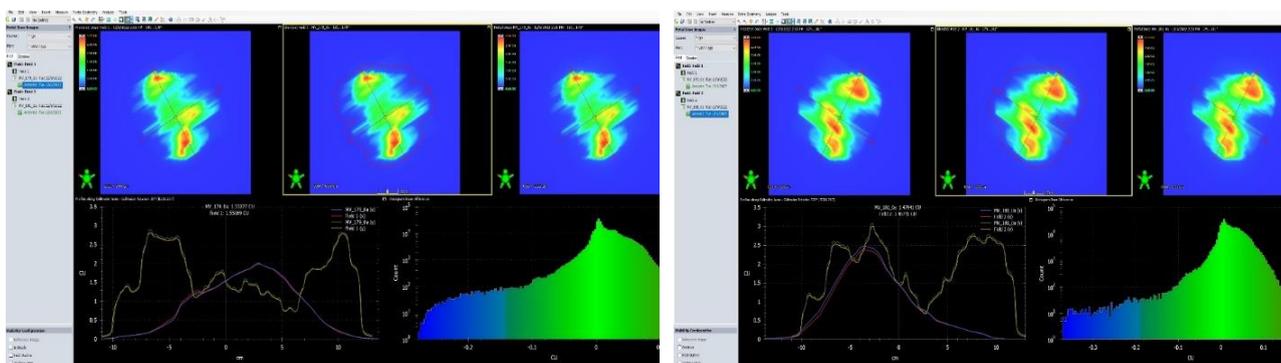
Одним из достоинств данного метода контроля качества является возможность получения изображения за считанные секунды. С системой управления дистанционного компьютера на линейном ускорителе получение изображения могут выполняться удаленно. Еще одной важной особенностью является то, что изображения представлены в цифровой форме, которое позволяет применять программные средства для извлечения информации, имеющей отношение к проверке лечения.

На вышеуказанном рисунке 3 показано совпадение кривых. Для системы планирования и программы реконструкция различия вычисленных алгоритмов дозы дают небольшие отклонения. При работе ускорителя и EPID-панели найденные отклонения аппаратных ошибок не являются значимыми.

На рисунке 4 изображен гамма-анализ плана лечения с модуляцией интенсивности (VMAT).

С помощью полученного анализа кривых определяется критерий дальнейшего использования лечебного плана. В случае, когда охват объема предполагаемого облучения с гамма ≤ 1 имеет значение не менее 95 % от максимального, то этот план считается допустимым.

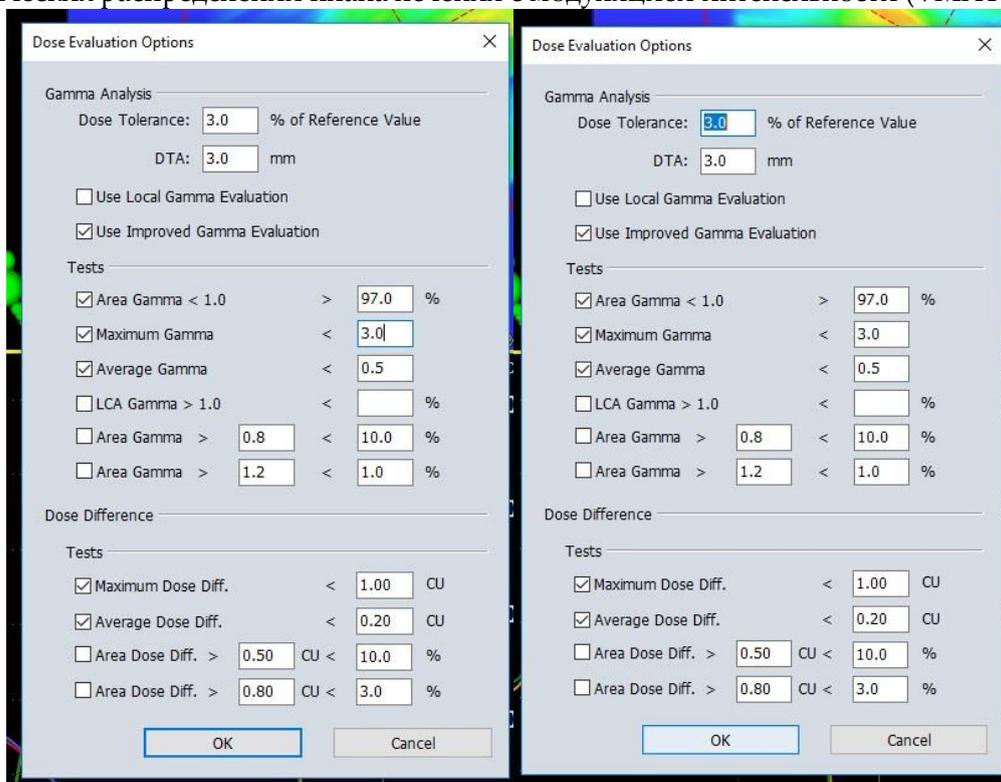
Гамма-анализ является быстрым, точным и эффективным методом контроля качества плана, которое позволяет качественно оценить данные, то есть полученные кривые отмеренные с помощью EPID-панели средствами портальной дозиметрии [6,7,8]



а) первое поле, б) второе поле
Рисунок 4. Гамма-анализ плана лечения с модуляцией интенсивности (VMAT)

В данном плане с модуляцией интенсивности (VMAT) покрытие физического объема облучения составляет 97 %, гамма-индекс ≤ 1 .

Показанные на рисунке 5 параметры гаммасред., гамматах позволяют оценить качество дозиметрических распределений плана лечения с модуляцией интенсивности (VMAT).



а) первое поле б) второе поле
Рисунок 5. Гамма-анализ плана лечения с модуляцией интенсивности (VMAT)

4. Выводы

Анализ полученных результатов, произведенных во время контроля качества лечебных планов на линейном ускорителе VitalBeam, выполненных с помощью портальной дозиметрии подтверждают эффективность данной методики. Анализ установленных условий позволяет отвергнуть ошибочные лечебные планы.

С использованием данного метода можно регулировать отпускаемую источником ионизирующего излучения абсолютную дозу. Исходя из данных, показанных в работе можно утверждать, что данный метод имеет преимущества при сопоставлении его с другими методами

проверки планов. Отличительной особенностью гамма-анализа в данном случае является получение результатов за считанные секунды, дистанционное управление, получение цифровых изображений и кривых.

Список литературы

1. Slotman B. J., Solberg T. D., Verellen D. Extracranial Stereotactic Radiotherapy and Radiosurgery. N. Y., 2006.
2. Kjaer-Kristoffersen F., Ohlhues L., Medin J., Korreman S. Rapid Arc Volumetric Modulated Therapy Planning for Prostate Cancer Patients // Acta Oncol. –2009. –Vol. 48. –P. 227–232.
3. Наркевич Б.Я. д.физ.-мат. наук, к.т.н Т.Г.Патнер Перевод с английского под общей редакцией НИЯУ «МИФИ» Контроль качества медицинских линейных ускорителей, – Москва. – 2018.– С.141.
4. Тарутин, И.Г. Радиационная защита при медицинском облучении // Приборы и методы измерений.- М.; Высшая школа. - 2005.- 335 с.
5. Chun M. Effect of dose grid resolution on the results of patient-specific quality assurance for intensity-modulated radiation therapy and volumetric modulated arc therapy // Int. J. Radiat. Res. – 2020.– Vol. 18, № 3. – P.521–530.
6. Zh. Yergozhina, A. Kassymov. Quality control performance analysis with the machine performance check software to check the VitalBeam linear accelerator// Вестник университета Шакарима. Технические науки. – No 4(4) 2021. –С.31.
7. Klein EE, Hanley J, Bayouth J, Yin F-F, Simon W, Dresser S, et al. Task Group 142 report : quality assurance of medical accelerators // Med Phys. Eng . – 2009. – N 36:4197. – P. 212.
8. International Electrotechnical Commission Publication 977. Medical electron accelerators in the range 1 MeV-50 MeV – guidelines for functional performance characteristics. 1989.

Ж.Б. Ергожина^{1,2}, А.Б. Касымов¹, Г.Н. Байтанатова², Г.А. Баймуханова²

¹“Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті” КеАҚ, Семей, Қазақстан

²ШЖҚ “Павлодар облыстық онкологиялық диспансері” коммуналдық мемлекеттік кәсіпорны, Павлодар, Қазақстан

Vitalbeam сызықтық үдеткішінде сәулелік терапиядағы көлемдік модуляцияланған доғалық терапияның (vmat) сапасын бақылау

Аңдатпа. Заманауи сәулелік терапияда медициналық физика әдістерінің маңыздылығы көрсетілген. Сәулелік терапияда қолданылатын сәулелену түрлері қарастырылады. Әрбір кезеңде барлық процедуралардың жоғары дәлдігін сақтау қажет. Маңызды кезеңдердің бірі емдеуді жоспарлау болып табылады, мұнда науқасты емдеудің дәлдігін қамтамасыз ету үшін жоспардың сапасын бақылау жүзеге асырылады.

Vitalbeam сызықтық үдеткішінде қарқындылығы модуляцияланған (Volumetric Modulated Arc Therapy - VMAT) сәулелік терапия кезінде сәулелену жоспарларының сапасын бақылау процесі ұсынылған. Қарқындылығы модуляцияланған сәулелік терапия жоспарының (Volumetric Modulated Arc Therapy - VMAT) порталдық детекторында (электрондық порталдық Бейнелеу құрылғысы, EPID) сапаны бақылаудың кеңінен қолданылатын әдісі қарастырылған. Дозаны бөлуді салыстыру, яғни дозаны бөлу тізбектерінің қабаттасуы. Қарқындылықты модуляциялау жоспары үшін изодоздық сызықтар мен доза-көлемдік гистограмма ұсынылған, сонымен қатар емдеу жоспарларын дозиметриялық зерттеу үшін клиникалық тәжірибеде қолданылатын негізгі өлшемдік геометриялар сипатталған.

Қарқындылықты модуляциялайтын гамма-талдау жоспары (VMAT) және гамма-талдау

критерийлері анықталды. Соңдай-ақ экспозицияның нақты көлемін қамту. VitalBeam сызықтық үдеткішінде қарқындылықты модуляциялау (VMAT) емдеу жоспарының дозиметриялық таралу сапасын бақылауды бағаланды.

Түйін сөздер: сәуделік терапия, VitalBeam сызықтық үдеткіші, Volumetric Modulated Arc терапиясы - VMAT, сапаны бақылау, тексеру, EPID, гамма-анализ.

Zh. Yergozhina^{1,2}, A. Kassymov¹, G. Baitanatova², G. Baimukhanova²

¹"Shakarim University of Semey" NP JSC, Semey, Kazakhstan

²Municipal state enterprise on the right of economic management "Pavlodar regional oncological dispensary", Pavlodar, Kazakhstan

Quality control of intensity-modulated plans (volumetric modulated arc therapy - vmat) in radiation therapy on the vitalbeam linear accelerator

Abstract. The importance of medical physics methods in modern radiation therapy is shown. The types of irradiation used in radiation therapy are considered. At each stage, it is necessary to maintain high accuracy of all procedures. One of the significant stages is the treatment planning, where the quality control of the plan is carried out to ensure the accuracy of the treatment of the patient.

The process of quality control of radiation plans in radiation therapy with intensity modulation (Volumetric Modulated Arc Therapy - VMAT) on the VitalBeam linear accelerator is presented. The widely used method of quality control on the portal detector (Electronic Portal Imaging Device, EPID) of the radiation therapy plan with intensity modulation (Volumetric Modulated Arc Therapy - VMAT) is considered. Comparison of dose distribution that is the overlapping of dose distribution contours. Isodose lines and a dose-volume histogram for a plan with intensity modulation are presented and the main dimensional geometries used in clinical practice for dosimetric examination of treatment plans are described.

Intensity modulated plan gamma analysis (VMAT) and gamma analysis criteria are defined. As well as the coverage of the physical volume of exposure. Quality control of dosimetric distributions of the intensity modulated treatment plan (VMAT) on the VitalBeam linear accelerator was assessed.

Keywords: radiation therapy, linear accelerator VitalBeam, Volumetric Modulated Arc Therapy - VMAT, QA, verification, Electronic Portal Imaging Device, gamma analysis.

References

1. Slotman B. J., Solberg T. D., Verellen D. Extracranial Stereotactic Radiotherapy and Radiosurgery. N. Y., 2006.
2. Kjaer-Kristoffersen F., Ohlhues L., Medin J., Korreman S. Rapid Arc Volumetric Modulated Therapy Planning for Prostate Cancer Patients // Acta Oncol. –2009. –Vol. 48. –R. 227–232.
3. Narkevich B.Ya. d.fiz.-mat. nauk, k.t.n T.G.Ratner Perevod s angliyskogo pod obshchey redaktsiey NIYaU «MIFI» Kontrol' kachestva meditsinskikh lineynykh uskoriteley, – Moskva. – 2018.– S.141.
4. Tarutin, I.G. Radiatsionnaya zashchita pri meditsinskom obluchenii // Pribory i metody izmereniy.- M.; Vysheyschaya shkola. - 2005.- 335 s.
5. Chun M. Effect of dose grid resolution on the results of patient-specific quality assurance for intensity-modulated radiation therapy and volumetric modulated arc therapy // Int. J. Radiat. Res. – 2020.– Vol. 18, № 3. – P.521–530.
6. Zh. Yergozhina, A. Kassymov. Quality control performance analysis with the machine performance check software to check the VitalBeam linear accelerator// Vestnik universiteta Shakarima. Tekhnicheskie nauki. – No 4(4) 2021. –S.31.

7. Klein EE, Hanley J, Bayouth J, Yin F-F, Simon W, Dresser S, et al. Task Group 142 report : quality assurance of medical accelerators // Med Phys. Eng . – 2009. – N 36:4197. – P. 212.

8. International Electrotechnical Commission Publication 977. Medical electron accelerators in the range 1 MeV-50 MeV – guidelines for functional performance characteristics. 1989.

Сведения об авторах:

Ергожина Ж.Б. – магистрант 2 курса кафедры технической физики и теплоэнергетики, НАО “Университет имени Шакарима города Семей”, ул. Глинки, Семей, Казахстан; медицинский физик, КПП на ПХВ “Павлодарский областной онкологический диспансер”, ул.Российская, Павлодар, Казахстан.

Касымов А.Б. – PhD, и.о. ассоциированного профессора кафедры техническая физика и теплоэнергетика, НАО "Университет имени Шакарима города Семей", ул.Глинки, 20А, Семей, Казахстан.

Байтанатова Г.Н. – медицинский физик, КПП на ПХВ “Павлодарский областной онкологический диспансер”, ул.Российская, Павлодар, Казахстан.

Баймуханова Г.А. – магистр физики по направлению медицинская физика; медицинский физик, КПП на ПХВ “Павлодарский областной онкологический диспансер”, ул.Российская, Павлодар, Казахстан.

Ергожина Ж.Б. – техникалық физика және жылуэнергетика кафедрасының 2 курс магистранты, “Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті” КеАҚ, Глинки к., Семей, Қазақстан; медициналық физик, ШЖҚ “Павлодар облыстық онкологиялық диспансері” коммуналдық мемлекеттік кәсіпорны, Российская к., Павлодар, Қазақстан.

Касымов А.Б. – PhD, техникалық физика және жылуэнергетика кафедрасының қауымдарстырылған профессор м.а., "Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті", Глинки 20А көш., Семей, Қазақстан.

Байтанатова Г.Н. – медициналық физик, ШЖҚ “Павлодар облыстық онкологиялық диспансері” коммуналдық мемлекеттік кәсіпорны, Российская к., Павлодар, Қазақстан.

Баймуханова Г.А. – медициналық физика бағыты бойынша физика магистрі; медициналық физик, ШЖҚ “Павлодар облыстық онкологиялық диспансері” коммуналдық мемлекеттік кәсіпорны, Российская к., Павлодар, Қазақстан.

Zh.Yergozhina – 2nd year master's student of the department of technical physics and thermal Power Engineering, “Shakarim University of Semey” NP JSC, Glinka 20A street, Semey, Kazakhstan.; medical physicist, Municipal state enterprise on the right of economic management "Pavlodar regional oncological dispensary", Rossiyskaya street, Pavlodar, Kazakhstan.

A. Kassymov – PhD, acting associate professor of the department of technical physics and heat power engineering, Glinka 20A street, Semey, Kazakhstan.

G. Baitanatova – medical physicist, Municipal state enterprise on the right of economic management "Pavlodar regional oncological dispensary", Rossiyskaya street, Pavlodar, Kazakhstan.

G. Baimukhanova – Master of Physics in Medical Physics, medical physicist, Municipal state enterprise on the right of economic management "Pavlodar regional oncological dispensary", Rossiyskaya street, Pavlodar, Kazakhstan.

Бас редакторы: **К.Ш. Жумадилов**

Авторларға арналған нұсқаулықтар,
жарияланым этикасы журнал сайтында берілген: <http://bulphysast.enu.kz>

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Хабаршысы.
Физика. Астрономия сериясы.
- 4(141)/2022 - Астана: ЕҰУ. - 48 б.
Шартты б.т. – 3. Таралымы - 15 дана.
Басуға қол қойылды: 30.12.2022 ж.
Ашық қолданыстағы электронды нұсқа: <http://bulphysast.enu.kz>

Мазмұнына типография жауап бермейді

Редакция мекен-жайы: 010008, Қазақстан Республикасы Астана қ.,
Сәтбаев көшесі, 2.

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті
Тел.: +7(71-72) 70-95-00 (ішкі 31-315)

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің баспасында
басылды.