

<https://vestnikmephi.elpub.ru>

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА «МИФИ»



ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА «МИФИ»

Том 12 № 6 2023 НОЯБРЬ - ДЕКАБРЬ

Основан в июле 2012 г.
Выходит 6 раз в год
ISSN: 2304-487X

Главный редактор
М.Н. Стриханов

Редакционная коллегия:

А.В. Аксёнов, Pavel Bedrikovetsky,
А.М. Гальпер, С.Г. Гаранин, Vladimir S. Gerjikov, Н.Н. Евтихийев,
Yalchin Efendiev, Alexei I. Zhurov, Н.П. Калашников, Н.И. Каргин,
С.А. Кащенко, О.Н. Крохин,
Н.А. Кудряшов (*заместитель главного редактора*),
Raytcho Lazarov, О.В. Нагорнов, А.Д. Полянин,
В.В. Цегельник, Б.Н. Четверушкин,
М.А. Чмыхов (*ответственный секретарь*), William E. Schiesser

Выпускающий редактор: Н.В. Ермолаева

Адрес редакции: 115409, Москва, Каширское ш., 31,
Вестник НИЯУ МИФИ
Интернет: <https://vestnikmephi.elpub.ru>
Электронная почта: vestnik@mephi.ru

Москва
НИЯУ МИФИ

СОДЕРЖАНИЕ

Том 12, № 6, 2023

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

- Исследование возможности формирования медицинского электронного пучка с помощью устройств, изготовленных из пластиков с металлическими примесями**
Е.А. Бушмина, А.А. Булавская, А.А. Григорьева, И.А. Милойчикова, В.О. Сабуров, С.Г. Стучебров 313
-

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

- Об одном классе дифференциальных уравнений с решениями в виде уединенных волн**
Н.А. Кудряшов, Н.В. Ермолаева 321
- Численное исследование обобщенной модели Чави–Вадди–Колокольникова**
А.А. Кутуков, Н.А. Кудряшов 326
- Устойчивость численного решения обобщенного нелинейного уравнения Шрёдингера четвертого порядка с нелинейностями третьей, пятой, седьмой и девятой степеней**
А.А. Байрамуков, Н.А. Кудряшов 332
-

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

- Средства электронного обучения для ядерной физики и инженерии**
Н.Е. Сидоров, Е.Б. Весна, К.В. Клыгина, Ю.А. Панебратцев, Г.В. Тихомиров 339
- Разработка численной модели для определения глубинного распределения доз электронов в модифицированных пластиках**
А.А. Сорокина, А.А. Булавская, Е.А. Бушмина, А.А. Григорьева, И.А. Милойчикова, С.Г. Стучебров 352
-

АВТОМАТИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

- Оперативный контроль работоспособности цифровых рентгенодиагностических аппаратов до начала приема пациентов**
М.Р. Ахмедзянова, М.И. Зеликман, С.А. Кручинин, З.А. Лантух, И.В. Солдатов, Ю.А. Васильев, Ю.В. Дружинина, А.О. Толоконский 357

Contents

Volume 12, Number 6, 2023

TECHNICAL PHYSICS

The possibility investigation of the medical electron beam shaping using devices made from plastics with metal impurities

*E.A. Bushmina, A.A. Bulavskaya, A.A. Grigorieva, I.A. Miloichikova,
V.O. Saburov, S.G. Stuchebrov*

313

MATHEMATICAL MODELS AND NUMERICAL METHODS

About one class of differential equations with solutions in the form of solitated waves

N.A. Kudryashov, N.V. Ermolaeva

321

Numerical study of the generalized Chavy–Waddy–Kolokolnikov model

A.A. Kutukov, N.A. Kudryashov

326

Stability of the numerical solution of the fourth order generalized nonlinear Schrödinger equation with cubic–quintic–septic–nonic nonlinearity

A.A. Bayramukov, N.A. Kudryashov

332

COMPUTER SIMULATION OF PHYSICAL AND TECHNOLOGICAL PROCESSES

E-learning tools for nuclear physics and engineering

N.E. Sidorov, E.B. Vesna, K.V. Klygina, Yu.A. Panebrattsev, G.V. Tikhomirov

339

Development of a numerical model for determining the electron beam depth dose distribution in modified plastics

*A.A. Sorokina, A.A. Bulavskaya, E.A. Bushmina, A.A. Grigorieva, I.A. Miloichikova,
S.G. Stuchebrov*

352

AUTOMATION AND ELECTRONICS

Operational monitoring of the operability of digital X-ray diagnostic devices before the start of patient admission

*M.R. Akhmedzyanova, M.I. Zelikman, S.A. Kruchinin, Z.A. Lantukh, I.V. Soldatov,
Y.A. Vasilev, Yu.V. Druzhinina, A.O. Tolokonkiy*

357

УДК 621.384.66

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МЕДИЦИНСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С ПОМОЩЬЮ УСТРОЙСТВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ПЛАСТИКОВ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПРИМЕСЯМИ

Е.А. Бушмина^{1,2*}, А.А. Булавская¹, А.А. Григорьева¹, И.А. Милойчикова^{1,3},
В.О. Сабуров⁴, С.Г. Стучебров¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, 634050, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

³Научно-исследовательский институт онкологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр
Российской академии наук, Томск, 634009, Россия

⁴Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба, Обнинск, 249036, Россия

*e-mail: eab60@tpu.ru

Поступила в редакцию 16.10.2023

После доработки: 18.10.2023

Принята к публикации: 07.11.2023

В современной практике для электронной лучевой терапии применяются коллиматоры, которые позволяют формировать поле облучения стандартных форм. Однако опухоли имеют сложные формы, поэтому необходимо использовать коллиматоры с индивидуальной формой коллимационного окна, которые изготавливаются из металлических сплавов. Процесс производства таких устройств достаточно трудоемкий, что накладывает ограничения на их повсеместное применение. Перспективным направлением изготовления коллиматоров является трехмерная печать методом послойного наплавления, которая позволяет быстро и с высокой точностью производить объемные объекты. Однако применяемые сейчас полимерные материалы позволяют напечатать изделие с плотностью до 1.3 г/см^3 , что приводит к необходимости изготовления коллиматора относительно большой толщины. В данной работе предлагается использовать пластики с металлическими примесями для печати коллиматоров для электронной лучевой терапии. Было проведено численное моделирование методом Монте-Карло, где была рассчитана толщина коллиматора, необходимая для поглощения пучков электронов терапевтического диапазона. В результате был разработан и напечатан модульный коллиматор, позволяющий варьировать диаметр коллимационного отверстия от 0.5 до 6 см. По экспериментальным данным, полученным для медицинского электронного пучка с энергией 6 МэВ, было определено, что напечатанное устройство позволяет формировать заданный размер радиационного поля, соответствующий диаметру коллимационного отверстия. Особенности при формировании полей электронного пучка пластиковым коллиматором должны учитываться в процессе планирования процедур электронной лучевой терапии.

Ключевые слова: электронная лучевая терапия; коллиматор; метод послойного наплавления; пластики с металлической примесью; профиль медицинского электронного пучка.

DOI: 10.26583/vestnik.2023.278

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день эффективность лечения опухолевых заболеваний достигается при помощи комбинации терапевтических методов – хирургии, химиотерапии и лучевой терапии. В зависимости от локализации и вида новообразований назначается сочетание необходимых методов лечения. Эффективность лечения поверхностных новообразований или ложа опухоли, т.е. области, оставшейся вблизи удаленной во время операции опухоли, достигается с помощью использования медицинских пучков

высокоэнергетических электронов [1, 2]. Такой метод лечения называется электронной лучевой терапией, которая может быть реализована как классическое дистанционное облучение, так и интраоперационное, которое проводится непосредственно в процессе операционного вмешательства [3]. Особое значение в отношении электронной лучевой терапии имеют такие устройства, как болусы, компенсаторы и коллиматоры, формирующие поле облучения [4, 5].

Болусы или компенсаторы позволяют сместить дозовое распределение ближе к поверхно-

сти тела пациента, что важно для дистанционной электронной лучевой терапии, которая предназначена для лечения новообразований, залегающих неглубоко в тканях [4]. Коллиматоры, в свою очередь, позволяют задать необходимую форму поля облучения. Стандартные коллиматоры представляют собой металлические или пластиковые устройства, имеющие в поперечном сечении форму круга или квадрата [5, 6]. Тем не менее для электронной лучевой терапии актуальной задачей остается разработка коллиматоров, позволяющих задавать поля облучения сложной формы.

Мировым научным сообществом ведутся разработки по созданию индивидуальных полей облучения медицинским электронным пучком с помощью специального многолепесткового коллиматора, представляющего собой дополнительную систему, которая крепится к терапевтической головке линейного ускорителя [6–8]. Применение многолепестковых коллиматоров накладывает ограничение на степени свободы при вращении головки терапевтического аппарата, так как данное устройство должно быть расположено в непосредственной близости к коже пациента. Также необходимо интегрировать систему управления движением лепестков дополнительного коллиматора в программно-аппаратный комплекс линейного ускорителя [6, 7]. С другой стороны, в медицинской практике часто изготавливают металлические коллиматоры индивидуальной формы с помощью резки и литья как из свинца, так и из особого сплава Вуда [8, 9]. Однако их изготовление имеет ряд ограничений, в числе которых неточность при изготовлении, ядовитые испарения, необходимость применения специального оборудования [10]. Таким образом, актуальным является разработка комбинированного универсального устройства, позволяющего сформировать поле облучения в соответствии с конкретной задачей.

Для создания сложных комбинированных коллиматоров перспективным является использование аддитивных технологий [10–12]. Аддитивные технологии, в основе которых лежит метод послойного наплавления, позволяют быстро и с высокой точностью изготавливать объекты сложной формы [13, 14]. Более того коллиматоры, изготовленные с помощью трехмерной печати, дают возможность сформировать заданное поле облучения для электронной лучевой терапии с минимальными дополнительными затратами и без модернизации суще-

ствующего оборудования или программного обеспечения для планирования лечения [10–12].

В ряде работ описывается разработка коллиматоров, изготовленных при помощи трехмерной печати из полимерных материалов. Разработанные устройства показывают свою эффективность как в формировании поля облучения, так и в точности доставки дозы [10, 11]. Рассматриваемые в работах полимерные материалы имеют массовую плотность не более 1.3 г/см^3 [15, 16], а значит, изготавливаемые коллиматоры должны иметь относительно большую толщину для поглощения высокоэнергетических электронов, что требует модернизации системы фиксации такого изделия в системе формирования клинического линейного ускорителя. С целью уменьшения геометрических размеров предлагается использовать специально создаваемые пластиковые материалы с металлической примесью. Такие материалы изготавливаются путем вмешивания гранул металла в гранулы пластика, из которых потом создаются филаменты – пластиковые нити, используемые в методе послойного наплавления. Известными и широко используемыми на данный момент металлическими примесями являются титан, медь, бронза, нержавеющая сталь и железо [17].

В соответствии с вышесказанным целью данной работы стало исследование возможности формирования медицинского электронного пучка с помощью комбинированного универсального коллиматора, изготовленного из пластика с металлической примесью.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Метод послойного наплавления

Метод послойного наплавления – метод аддитивного производства, с помощью которого создается трехмерный объект путем последовательного нанесения слоев пластикового филамента, повторяющих контуры цифровой модели [18].

Сначала создается цифровая трехмерная модель изделия, которое будет изготовлено. Затем в специальной программе цифровая модель разбивается на слои и размещается на рабочей платформе наиболее подходящим образом для печати, где модель конвертируется в файл с расширением «.gcode», в котором заданы параметры печати изделия с учетом конструктивных особенностей конкретного 3D-принтера.

После этого начинается процесс трехмерной печати методом послойного наплавления. В начале осуществляется нагрев пластикового материала до температур плавления и его выдавливание через экструзионную часть нагревательного блока 3D-принтера. При этом данный процесс экструзии происходит через сопло, в котором поддерживается резкий перепад температур для обеспечения равномерной подачи пластика [18]. Пластик последовательными слоями наносится на рабочую платформу согласно объемной цифровой модели и через короткий промежуток времени становится готовым изделием.

Пластиковые материалы с медной примесью

Для осуществления трехмерной печати методом послойного наплавления используются специально изготовленные пластиковые материалы, представляющие собой тонкую нить пластика – филамент. Представленные на данный момент пластиковые материалы могут содержать металлические примеси, цель которых состоит в увеличении массовой плотности материала и, соответственно, сокращении геометрических размеров напечатанных изделий [17].

В данном исследовании рассмотрен коммерчески доступный материал BFCopper (Bestfilament, Россия) [19], в котором в качестве примеси используются гранулы меди с фракцией до 100 мкм, а в качестве основного материала используется полилактид, также известный как ПЛА-пластик. Пластик с медной примесью отличается от стандартно используемых пластиков характерным металлическим блеском и большей плотностью (до 1.6 г/см³).

Моделирование глубинного распределения дозы в исследуемых материалах

Одним из важных этапов любого исследования является математическое моделирование. Методом математического моделирования, который с высокой точностью описывает взаимодействие электронов с веществом, является метод Монте-Карло, на основе которого проводится дозиметрическое планирование [20, 21], в том числе при лечении электронными пучками. В методе Монте-Карло учитываются различные параметры, влияющие на процесс взаимодействия электронов с веществом, одним из которых является массовая плотность моделируемого объекта.

Уникальность трехмерной печати позволяет варьировать свойства готовых изделий при изменении параметров печати, поэтому необходимо исследовать эти свойства, в частности массовую плотность готовых объектов. Для этого было изготовлено тестовое цилиндрическое изделие из BFCopper размерами: диаметр – 20 мм, высота – 20 мм. Образец был напечатан на 3D-принтере Prusa i3 MK3s+ (Prusa Research, Чехия) [22] со следующими параметрами печати: коэффициентом заполнения, равным 100 %; коэффициентом экструзии, равным единице; скоростью печати, равной 60 мм/с, и температурой экструдера, равной 215 °С. В результате была определена массовая плотность образца, которая составила 1.3 г/см³.

Для оценки взаимодействия электронного пучка с пластиком с металлической примесью было проведено математическое моделирование глубинного распределения дозы в исследуемом материале с использованием инструментария Geant4 (CERN, Швейцария) [23] (рис. 1). Энергии электронов в моделировании заданы от 6 до 15 МэВ, так как данный диапазон энергий является наиболее часто применяемым в клинической практике при лечении электронными пучками [2, 3].

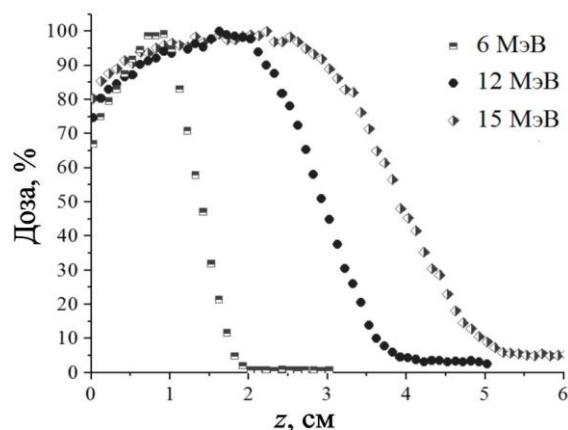


Рис. 1. Расчетные процентные глубинные распределения дозы электронных пучков в BFCopper

Результаты моделирования показали, что для поглощения электронов энергией 6 МэВ необходимо 2 см BFCopper, энергиями 12 и 15 МэВ – 4 и 5 см BFCopper, соответственно. На основе полученных данных можно сказать о том, что толщины 5 см изделий, изготовленных из BFCopper, достаточно для эффективного формирования медицинского электронного пучка с диапазоном энергий от 6 до 15 МэВ.

*Изготовление комбинируемого
пластикового коллиматора*

На основе данных, полученных в моделировании, а именно определения толщины изделия, равной 5 см, была разработана цифровая трехмерная модель комбинируемого пластикового коллиматора (рис. 2).

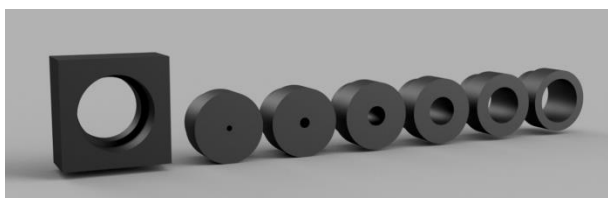


Рис. 2. Цифровая трехмерная модель комбинируемого пластикового коллиматора

Данный коллиматор (см. рис. 2) представляет собой модульную конструкцию, включающую в себя основание в форме параллелепипеда высотой 5 см, шириной и длиной – 10 см, с цилиндрическим отверстием в центре и набор вставок с цилиндрическими отверстиями, диаметрами от 0.5 до 6 см. Форма отверстия в основании коллиматора и внешние границы вставок предусматривают наличие ступенчатого перехода, обеспечивающего плотную фиксацию элементов и экранирование электронов, рассеянных на границе стыков. Таким образом, разработанный комбинируемый коллиматор позволяет варьировать диаметр отверстия от 0.5 до 6 см, что отличается от диаметров отверстий стандартных коллиматоров.

На основе разработанной цифровой модели, было изготовлено формирующее устройство (коллиматор) с помощью 3D-принтера Prusa i3 MK3s+ из BFCopper.

*Экспериментальные исследования
на медицинском электронном пучке*

Для апробации предложенного подхода формирования медицинского электронного пучка с помощью формирующего устройства, изготовленного методом послойного наплавления из пластиков с металлической примесью, было проведено экспериментальное исследование. Эксперимент был проведен при стандартных условиях облучения на медицинском линейном ускорителе электронов Novac 11 (S.I.T. Sordina IORT Technologies S.p.A., Италия) [24], предназначенном для проведения интраопера-

ционной лучевой терапии, в Медицинском радиологическом исследовательском центре имени А.Ф. Цыба (Обнинск, Россия). Особенностью данной установки является применение специальных устройств – аппликаторов (тубусов), предназначенных для формирования поля облучения в непосредственном контакте с ложем опухоли. Экспериментальные параметры: энергия электронов – 6 МэВ, приписанная доза – 2 Гр, длина аппликатора (тубуса) – 100 см, расстояние от выходного окна коллиматора до поверхности фантома – 5 см, диаметр стандартного аппликатора – 10 см (рис. 3).

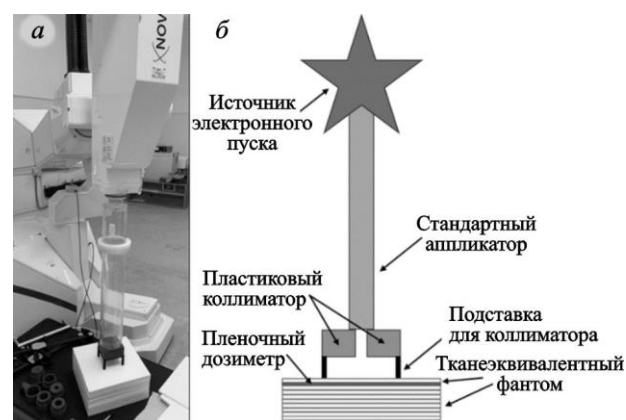


Рис. 3. Внешний вид экспериментальной установки на медицинском линейном ускорителе Novac 11 (а), схема эксперимента в поперечном сечении (б)

Пленочные дозиметры Gafchromic EBT3 (Ashland Advanced Materials, США) [25] использовались в качестве детектора. Пленочные дозиметры располагались в тканеэквивалентном фантоме SP34 (IBA Dosimetry, Германия) [26] на глубине 1 мм перпендикулярно плоскости распространения пучка. Доза облучения составляла 2 Гр на глубине дозного максимума в воде. Для каждого модуля с определенным диаметром отверстия был использован отдельный пленочный дозиметр. Обработка данных, полученных с помощью пленочных дозиметров Gafchromic EBT3, проводилась с использованием сканера Epson Perfection V850 Pro (Epson America, Inc., США) [27] в соответствии с рекомендациями производителя [28].

Для получения распределений поглощенной дозы использовалась программа Film Dosimetry Digitizer (FiDoDig). Данная программа позволяет преобразовывать оптическую плотность пленочного дозиметра в значения поглощенной дозы с учетом предварительной калибровки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Из данных распределения дозы, полученных с помощью пленочных дозиметров, были определены поперечные профили электронного пучка для центральной области поля облучения или, другими словами, изодозы, лежащие перпендикулярно оси пучка на уровне изоцентра. Профиль пучка (изодоза) является одной из основных характеристик, определяемых при формировании медицинского пучка ионизирующего излучения. С помощью профилей находится размер радиационного поля, как полная ширина на полувысоте.

Для сравнения полученных профилей, сформированных разработанным напечатанным коллиматором для разных диаметров поля облучения, значения поглощенной дозы были нормированы на максимум открытого поля электронного пучка (рис. 4).

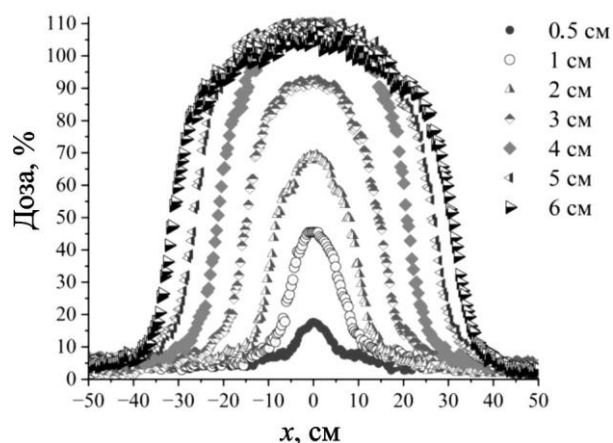


Рис. 4. Поперечные профили электронного пучка с энергией 6 МэВ, сформированные напечатанным коллиматором, нормированные на максимум открытого поля

В результате было определено, что напечатанное устройство позволяет формировать заданный размер радиационного поля, соответствующий диаметру коллимационного отверстия.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты свидетельствуют о возможности формирования медицинского электронного пучка с помощью формирующих устройств, изготовленных из пластиковых материалов с металлической примесью, в частности с медной примесью. Однако стоит отметить, что диаметры коллиматора в диапазоне от 0.5 до 3 см не достигают 100 % максимума погло-

щенной дозы открытого поля в центре профиля, а в диапазоне от 4 до 6 см – наоборот, превышают 100 % максимума поглощенной дозы открытого поля. Это связано с эффектом рассеяния на краях поглотителя, возникающего в результате взаимодействия электронов высоких энергий с веществом [29]. В одном случае, при слишком маленьком диаметре отверстия, электроны рассеиваются внутри коллиматора и теряют свою энергию так, что не доставляют требуемой дозы, так как внутри коллиматора толщина его стенок гораздо больше толщины их поглощения. В другом случае, при больших диаметрах, стенки коллиматора становятся меньше толщины поглощения электронов и при их рассеянии возникает увеличение доставляемой дозы. Таким образом, полученные данные показывают возможность изготовления комбинированного коллиматора методами трехмерной печати из модифицированных пластиков. Особенности сформированных полей, описанные выше, могут быть учтены в процессе планирования процедур электронной лучевой терапии.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10014-П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hendee W.R., Ibbott G.S., Hendee E.G. Radiation therapy physics. John Wiley & Sons, 2013. 360 p.
2. Hoskin P. External Beam Therapy. Oxford University Press, 2019. 560 p.
3. Calvo F.A., Serrano J., Cambeiro M., Aristu J., Asencio J.M., Rubio I., Delgado J.M., Ferrer C., Desco M., Pascau J. Intra-Operative Electron Radiation Therapy: An Update of the Evidence Collected in 40 Years to Search for Models for Electron-FLASH Studies // *Cancers*, 2022. V. 14. № 15. P. 3693. <https://doi.org/10.3390/cancers14153693>
4. Vyas V., Palmer L., Mudge R., Jiang R., Fleck A., Schaly B., Osei E., Charland P. On bolus for megavoltage photon and electron radiation therapy // *Medical Dosimetry*, 2013. V. 38. № 3. P. 268–273. <https://doi.org/10.1016/j.meddos.2013.02.007>
5. Chow J.C.L., Grigorov G.N. Peripheral dose outside applicators in electron beams // *Physics in Medicine & Biology*, 2006. V. 51. № 12. P. N231. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/51/12/N01>
6. Inyang S.O., Chamberlain A.C. Design and optimization of dual electron multileaf collimator // *Physica Medica: European Journal of Medical Physics*, 2015. V. 31. P. S5. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2015.07.103>

7. Eldib A, Jin L, Li J, Ma C-M. C. Feasibility of replacing patient specific cutouts with a computer-controlled electron multileaf collimator // *Physics in Medicine & Biology*, 2013. V. 58. № 16. P. 5653. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/58/16/5653>
8. Vatanen T, Traneus E., Lahtinen T. Comparison of conventional inserts and an add-on electron MLC for chest wall irradiation of left-sided breast cancer // *Acta Oncologica*, 2009. V. 48. № 3. P. 446–451. <https://doi.org/10.1080/02841860802477907>
9. Kawai Y., Tamura M., Amano M., Kamomae T., Monzen H. Dosimetric characterization of a novel surface collimator with tungsten functional paper for electron therapy // *Anticancer Research*, 2019. V. 39. № 6. P. 2839–2843. <https://doi.org/10.21873/anticancer.13412>
10. Schulz J. B., Gibson C., Dubrowski P., Marquez C. M., Million L., Qian Y., Skinner L., Yu A. S. Shaping success: clinical implementation of a 3D-printed electron cutout program in external beam radiation therapy // *Frontiers in Oncology*, 2023. V. 13. P. 1237037. <https://doi.org/10.3389/fonc.2023.1237037>
11. Miloichikova I., Bulavskaya A., Cherepennikov Y., Gavrikov B., Gargioni E., Belousov D., Stuchebrov S. Feasibility of clinical electron beam formation using polymer materials produced by fused deposition modeling // *Physica Medica*, 2019. V. 64. P. 188–194. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2019.07.014>
12. Skinner L., Fahimian B.P., Yu A.S. Tungsten filled 3D printed field shaping devices for electron beam radiation therapy // *PLoS One*, 2019. V. 14. № 6. P. e0217757 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217757>
13. Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M. Additive manufacturing technologies. Cham, Switzerland: Springer, 2021. 685 p.
14. Bushmina E.A., Bulavskaya A.A., Grigor'eva A.A., Miloichikova I.A., Stuchebrov S.G. The Influence of the Fill and Extrusion Factors in 3D Printing on the Electron and X-Ray Densities of Plastic Products // *Biomedical Engineering*, 2022. V. 56. № 4. P. 278–281. <https://doi.org/10.1007/s10527-022-10219-x>
15. Farbman D., McCoy C. Materials testing of 3D printed ABS and PLA samples to guide mechanical design // *International Manufacturing Science and Engineering Conference*. – American Society of Mechanical Engineers, 2016. V. 49903. P. V002T01A015. <https://doi.org/10.1115/MSEC2016-8668>
16. Crawford R. J., Martin P. J. *Plastics engineering*. Butterworth-Heinemann, 2020. 622 p.
17. Laureto J., Tomasi J., King J. A., Pearce J. M. Thermal properties of 3-D printed polylactic acid-metal composites // *Progress in Additive Manufacturing*, 2017. V. 2. P. 57–71. <https://doi.org/10.1007/s40964-017-0019-x>
18. Gao X., Qi S., Kuang X., Su Y., Li J., Wang D. Fused filament fabrication of polymer materials: A review of interlayer bond // *Additive Manufacturing*, 2021. V. 37. P. 101658. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101658>
19. BFCopper Bestfilament для 3D-принтеров 0.5 кг (1.75 мм) [Электронный ресурс]. URL: <https://bestfilament.ru/bfcopper/> (дата обращения: 01.10.2023).
20. Сорокина А.А., Булавская А.А., Григорьева А.А., Милоичикова И.А. Методы численного моделирования для оценки возможности применения болусов для гамма-терапии, изготовленных с помощью трехмерной печати. // Тезисы XXIII Всерос. конф. мол. уч. по математическому моделированию и информационным технологиям: Тезисы докладов, Новосибирск, 24–28 октября 2022 г. Новосибирск: ФГБНУ «ФИЦ ИВТ», 2022. С. 35.
21. Alhamada H., Simon S., Gulyban A., Gastelblum P., Pauly N., VanGestel D., Reynaert N. Monte Carlo as quality control tool of stereotactic body radiation therapy treatment plans // *Physica Medica*, 2021. V. 84. P. 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2021.02.025>
22. Original Prusa i3 MK3S+ 3D-printer [Электронный ресурс]. URL: <https://www.prusa3d.com/category/original-prusa-i3-mk3s/> (дата обращения: 01.10.2023).
23. Geant4 [Электронный ресурс]. URL: <https://geant4.web.cern.ch/> (дата обращения: 01.10.2023 г.).
24. NOVAC 11: mobile IOERT accelerator [Электронный ресурс]. URL: <https://www.soiort.com/novac-11/> (дата обращения: 01.10.2023).
25. EBT3 Dosimetry Film [Электронный ресурс]. URL: http://www.gafchromic.com/documents/EBT3_Specifications.pdf (дата обращения: 01.10.2023).
26. Phantoms for Absolute Dosimetry [Электронный ресурс]. URL: https://www.iba-dosimetry.com/fileadmin/user_upload/rt-br-e-phantoms-for-ad_rev2_0813.pdf (дата обращения: 01.10.2023).
27. Epson Perfection V850 Pro [Электронный ресурс]. URL: https://epson.com/Support/Scanners/Perfection-Series/Epson-Perfection-V850-Pro/s/SPT_B11B224201 (дата обращения: 01.10.2023).
28. Lewis D., Micke A., Yu X., Chan M. F. An efficient protocol for radiochromic film dosimetry combining calibration and measurement in a single scan // *Medical physics*, 2012. V. 39. № 10. P. 6339–6350. <https://doi.org/10.1118/1.4754797>
29. Stuchebrov S.G., Bulavskaya A.A., Cherepennikov Yu.M., Gargioni E., Grigorieva A.A., Miloichikova I.A. Influence of 3D-printed collimator thickness on near-the-edge scattering of high-energy electrons // *Journal of Instrumentation*, 2020. V. 15. № 04. P. C04023. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/04/C04023>

THE POSSIBILITY INVESTIGATION OF THE MEDICAL ELECTRON BEAM SHAPING USING DEVICES MADE FROM PLASTICS WITH METAL IMPURITIES

E.A. Bushmina^{1,2*}, A.A. Bulavskaya¹, A.A. Grigorieva¹, I.A. Miloichikova^{1,3}, V.O. Saburov⁴, S.G. Stuchebrov¹

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russia

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980, Russia

³Cancer Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences, Tomsk, 634009, Russia

⁴Medical Radiological Research Center named after A.F. Tsyba, Obninsk, 249036, Russia

*e-mail: eab60@tpu.ru

Received October 16, 2023; revised October 18, 2023; accepted November 07, 2023

In modern practice, collimators are employed in electron beam therapy to shape the radiation field into standard configurations. However, tumors often exhibit complex shapes, necessitating collimators with individually created collimation windows, typically made of metal alloys. The production of such devices is time-consuming, limiting their widespread use. A promising approach to collimator manufacturing lies in three-dimensional printing, using a fused filament fabrication that makes it possible to produce three-dimensional objects quick and accurate. Presently, the polymer materials used allow for 3D printing products with a density of up to 1.3 g/cm³, which leads the necessity to manufacture a collimator of relatively large thickness. This study proposes the utilization of plastics infused with metal impurities for 3D printing collimators created for the electron beam therapy. Numerical simulations were conducted using the Monte Carlo method to calculate the requisite collimator thickness for effective absorption of electron beams therapeutic energies range. Consequently, a modular collimator was designed and 3D printed, offering the flexibility to vary the diameter of the collimation window from 0.5 to 6 cm. Based on the experimental data obtained for the medical electron beam with an energy of 6 MeV, it was defined that the 3D printed device can effectively shaped a radiation field corresponding to the choosing diameter of the collimation window. It is important to consider the features of electron beam field shaping using a plastic collimator during the electron beam treatment planning.

Keywords: electron beam therapy; collimator; fused filament fabrication; plastics with metal impurity; medical electron beam profile.

REFERENCES

1. Hendee W.R., Ibbott G.S., Hendee E.G. Radiation therapy physics. John Wiley & Sons, 2013. 360 p.
2. Hoskin P. External Beam Therapy. Oxford University Press, 2019. 560 p.
3. Calvo F.A., Serrano J., Cambeiro M., Aristu J., Asencio J.M., Rubio I., Delgado J.M., Ferrer C., Desco M., Pascau J. Intra-Operative Electron Radiation Therapy: An Update of the Evidence Collected in 40 Years to Search for Models for Electron-FLASH Studies. *Cancers*, 2022. Vol. 14. No. 15. Pp. 3693 <https://doi.org/10.3390/cancers14153693>
4. Vyas V., Palmer L., Mudge R., Jiang R., Fleck A., Schaly B., Osei E., Charland P. On bolus for megavoltage photon and electron radiation therapy. *Medical Dosimetry*, 2013. Vol. 38. No. 3. Pp. 268–273 <https://doi.org/10.1016/j.meddos.2013.02.007>
5. Chow J.C.L., Grigorov G.N. Peripheral dose outside applicators in electron beams. *Physics in Medicine & Biology*, 2006. Vol. 51. No. 12. Pp. N231 <https://doi.org/10.1088/0031-9155/51/12/N01>
6. Inyang S.O., Chamberlain A.C. Design and optimization of dual electron multileaf collimator. *Physica Medica: European Journal of Medical Physics*, 2015. Vol. 31. Pp. S5 <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2015.07.103>
7. Eldib A., Jin L., Li J., Ma C-M. C. Feasibility of replacing patient specific cutouts with a computer-controlled electron multileaf collimator. *Physics in Medicine & Biology*, 2013. Vol. 58. No. 16. Pp. 5653 <https://doi.org/10.1088/0031-9155/58/16/5653>
8. Vatanen T., Traneus E., Lahtinen T. Comparison of conventional inserts and an add-on electron MLC for chest wall irradiation of left-sided breast cancer. *Acta Oncologica*, 2009. Vol. 48. No. 3. Pp. 446–451 <https://doi.org/10.1080/02841860802477907>
9. Kawai Y., Tamura M., Amano M., Kamomae T., Monzen H. Dosimetric characterization of a novel surface collimator with tungsten functional paper for electron therapy. *Anticancer Research*, 2019. Vol. 39. No. 6. Pp. 2839–2843 <https://doi.org/10.21873/anticancer.13412>
10. Schulz J.B., Gibson C., Dubrowski P., Marquez C.M., Million L., Qian Y., Skinner L., Yu A.S. Shaping success: clinical implementation of a 3D-printed electron cutout program in external beam radiation therapy.

apy. *Frontiers in Oncology*, 2023. Vol. 13. P. 1237037. <https://doi.org/10.3389/fonc.2023.1237037>

11. *Miloichikova I., Bulavskaya A., Cherepennikov Y., Gavrikov B., Gargioni E., Belousov D., Stuchebrov S.* Feasibility of clinical electron beam formation using polymer materials produced by fused deposition modeling. *Physica Medica*, 2019. Vol. 64. Pp. 188–194. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2019.07.014>

12. *Skinner L., Fahimian B.P., Yu A.S.* Tungsten filled 3D printed field shaping devices for electron beam radiation therapy. *PLoS One*, 2019. Vol. 14. No. 6. P. e0217757. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217757>

13. *Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M.* Additive manufacturing technologies. Cham, Switzerland: Springer, 2021. 685 p.

14. *Bushmina E.A., Bulavskaya A.A., Grigor'eva A.A., Miloichikova I. A., Stuchebrov S. G.* The Influence of the Fill and Extrusion Factors in 3D Printing on the Electron and X-Ray Densities of Plastic Products. *Biomedical Engineering*, 2022. Vol. 56. No. 4. Pp. 278–281. <https://doi.org/10.1007/s10527-022-10219-x>

15. *Farbman D., McCoy C.* Materials testing of 3D printed ABS and PLA samples to guide mechanical design. *International Manufacturing Science and Engineering Conference. – American Society of Mechanical Engineers*, 2016. Vol. 49903. P. V002T01A015. <https://doi.org/10.1115/MSEC2016-8668>

16. *Crawford R.J., Martin P.J.* *Plastics engineering*. Butterworth-Heinemann, 2020. 622 p.

17. *Laureto J., Tomasi J., King J.A., Pearce J.M.* Thermal properties of 3-D printed polylactic acid-metal composites. *Progress in Additive Manufacturing*, 2017. Vol. 2. Pp. 57–71. <https://doi.org/10.1007/s40964-017-0019-x>

18. *Gao X., Qi S., Kuang X., Su Y., Li J., Wang D.* Fused filament fabrication of polymer materials: A review of interlayer bond. *Additive Manufacturing*, 2021. Vol. 37. P. 101658. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101658>

19. BFCopper Bestfilament dlya 3D-printerov 0,5 kg (1,75 mm) [BFCopper Bestfilament for 3D printers 0.5 kg (1.75 mm)]. Available at: <https://bestfilament.ru/bfcopper/> (accessed 01.10.2023).

20. *Sorokina A.A., Bulavskaya A.A., Grigor'eva A.A., Milojchikova I.A.* Metody chislennogo modelirovaniya dlya ocenki vozmozhnosti primeneniya bol-yusov dlya gamma-terapii, izgotovlennyh s pomoshch'yu trekhmernoj pechati [Numerical modeling methods for assessing the possibility of using boluses for gamma therapy manufactured using three-dimensional printing]. Tezisy XXIII Vseros. konf. mol. uch. po matematich-eskomu modelirovaniyu i informacionnym tekhnologiyam: Tezisy dokladov, Novosibirsk, 24–28 oktyabrya 2022 g. [Abstracts of the XXIII All-Rus. Conf. of Young scient. in mathematical modeling and information technology: Abstracts, Novosibirsk, October 24–28, 2022.]. Novosibirsk: FSBSI «FRC ICT», 2022. P. 35 (in Russian).

21. *Alhamada H., Simon S., Gulyban A., Gastelblum P., Pauly N., VanGestel D., Reynaert N.* Monte Carlo as quality control tool of stereotactic body radiation therapy treatment plans. *Physica Medica*, 2021. Vol. 84. Pp. 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2021.02.025>

22. Original Prusa i3 MK3S+ 3D-printer. Available at: <https://www.prusa3d.com/category/original-prusa-i3-mk3s/> (accessed: 01.10.2023).

23. Geant4. Available at: <https://geant4.web.cern.ch/> (accessed: 01.10.2023).

24. NOVAC 11: mobile IOeRT accelerator. Available at: <https://www.soiort.com/novac-11/> (accessed: 01.10.2023).

25. EBT3 Dosimetry Film. Available at: http://www.gafchromic.com/documents/EBT3_Specifications.pdf (accessed: 01.10.2023).

26. Phantoms for Absolute Dosimetry. Available at: https://www.iba-dosimetry.com/fileadmin/user_upload/rt-br-e-phantoms-for-ad_rev2_0813.pdf (accessed: 01.10.2023).

27. Epson Perfection V850 Pro. Available at: https://epson.com/Support/Scanners/Perfection-Series/Epson-Perfection-V850-Pro/s/SPT_B11B224201 (accessed: 01.10.2023).

28. *Lewis D., Micke A., Yu X., Chan M. F.* An efficient protocol for radiochromic film dosimetry combining calibration and measurement in a single scan. *Medical physics*, 2012. Vol. 39. No. 10. Pp. 6339–6350. <https://doi.org/10.1118/1.4754797>

29. *Stuchebrov S.G., Bulavskaya A.A., Cherepennikov Yu.M., Gargioni E., Grigor'eva A.A., Miloichikova I.A.* Influence of 3D-printed collimator thickness on near-the-edge scattering of high-energy electrons. *Journal of Instrumentation*, 2020. Vol. 15. No.04. P. C04023. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/04/C04023>

УДК 517.91

ОБ ОДНОМ КЛАССЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ С РЕШЕНИЯМИ В ВИДЕ УЕДИНЁННЫХ ВОЛН

Н.А. Кудряшов^{1,*}, Н.В. Ермолаева^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
115409, Россия

²Волгодонский инженерно-технический институт НИЯУ МИФИ, Волгодонск, Ростовская обл., 347360, Россия
*e-mail: nakudryashov@mephi.ru

Поступила в редакцию: 08.11.2023

После доработки: 19.11.2023

Принята к публикации: 21.11.2023

Рассматривается специальный класс нелинейных дифференциальных уравнений, имеющих решения в виде уединенных волн. Основная особенность этих дифференциальных уравнений состоит в том, что они имеют решение на комплексной плоскости с произвольным порядком полюса. Показано, что использование модификации метода простейших уравнений позволяет найти точные решения в виде уединенных волн. Приведенный метод используется для получения стационарных уединенных волн для описания процессов в жидкости с пузырьками газа. Также указанный метод применяется для нахождения стационарных уединенных волн концентрации бактерий при учете фототаксиса.

Ключевые слова: нелинейное дифференциальное уравнение; метод простейших уравнений; уединенная волна; жидкость с пузырьками газа.

DOI: 10.26583/vestnik.2023.304

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что одной из важнейших задач математической физики является построение аналитического решения нелинейной математической модели. В настоящее время разработке методов построения решений посвящено большое количество работ (см., например, [1–18]). К наиболее популярным методам построения решений в настоящее время относятся метод гиперболического тангенса, метод G'/G -разложения и метод простейших уравнений. Все эти методы, как и многие другие, по своей сути основаны на использовании усеченного разложения общих решений нелинейных дифференциальных уравнений. Однако при описании некоторых физических процессов встречаются нелинейные уравнения в частных производных с произвольным полюсом общего решения на комплексной плоскости. В частности, для описания нелинейных волновых процессов в жидкости с газовыми пузырьками предложено следующее уравнение [19, 20, 21]

$$u_t + \alpha u u_x + \beta u_{xxx} = a u u_{xxx} + b u_x u_{xx}, \quad (1)$$

где $u(x, t)$ – плотность жидкости с пузырьками газа; α, β, a – параметры математической модели.

В данной работе также рассматривается математическая модель для описания бактериальных колоний [22, 23, 24]

$$v_t + v_{xx} + v_{xxx} - \delta \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_x v_{xx}}{v} \right) = 0, \quad (2)$$

где $v(x, t)$ – концентрация бактерий; δ – параметр модели.

Задача Коши для уравнений (1) и (2) методом обратного преобразования рассеяния не находится, поэтому будем искать точные решения этих уравнений, используя редукцию к бегущей волне. Заменив

$$u(x, t) = y(z), \quad v(x, t) = w(z), \quad z = x - C_0 t, \quad (3)$$

после интегрирования получаем следующие нелинейные обыкновенные дифференциальные уравнения

$$a y y_{zz} + \frac{1}{2} (b - a) y_z^2 - \beta y_{zz} - \frac{\alpha}{2} y^2 + C_0 y - C_1 = 0, \quad (4)$$

и

$$w w_{zzz} - \delta w_z w_{zz} + w w_z - C_0 w^2 + C_2 w = 0, \quad (5)$$

где C_1 и C_2 – произвольные константы.

В данной работе решения уравнений (4) и (5) находятся с учетом двух простых обыкновен-

ОБ ОДНОМ КЛАССЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ С РЕШЕНИЯМИ В ВИДЕ УЕДИНЁННЫХ ВОЛН

ных дифференциальных уравнений. Решение уравнения (4) ищем по формуле

$$y(z) = w(z) = AP(z)Q(z)^p, \quad (6)$$

где A – произвольная константа; p_i – полюс общего решения; $P(z)$ и $Q(z)$ – функции, являющиеся общими решениями двух уравнений

$$P(z) = \lambda P, \quad (7)$$

и

$$Q_z = k(Q^2 - Q). \quad (8)$$

Решения уравнений (7) и (8) хорошо известны и имеют вид

$$P(z) = \exp(\lambda(z - z_0)) \quad (9)$$

и

$$Q(z) = [1 + \exp\{k(z - z_1)\}]^{-1}. \quad (10)$$

Покажем, что существуют стационарные решения уравнений (4) и (5), выражаемые формулой (6).

СТАЦИОНАРНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ (4)

Рассмотрим уравнение (4) при $C_1 = C_0 = \beta = 0$. В этом случае уравнение (4) принимает вид

$$ayy_{zz} + \frac{(b-a)}{2}y_z^2 - \frac{\alpha}{2}y^2 = 0, \quad (11)$$

Отметим, что функции $P(z)$ и $Q(z)$ также являются решениями уравнений

$$P_{zz} = \lambda^2 P, \quad P_{zzz} = \lambda^3 P; \quad (12)$$

$$\begin{aligned} Q_{zz} &= k^2 Q(Q-1)(2Q-1), \\ Q_{zz} &= k^3 Q(6Q^3 - 12Q^2 + 7Q - 1). \end{aligned} \quad (13)$$

Подставляя (6) в уравнение (11) и принимая во внимание (7), (8), (12) и (13), получим алгебраические уравнения вида

$$\begin{aligned} (a+b)p + 2a &= 0, \\ kp - 2\lambda &= 0, \quad 2a\lambda^2 + \alpha p = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Из (14) получим следующие ограничения на параметры b , k и a

$$a = -\frac{\alpha p}{2\lambda^2}, \quad b = \frac{\alpha(p+2)}{2\lambda^2}, \quad k = \frac{2\lambda}{p}. \quad (15)$$

В случае выполнения условий (15) получаем решение уравнения (11) в виде

$$y(z) = \frac{Ae^{\lambda z}}{\left(1 + e^{\frac{2\lambda z}{p}}\right)^p}. \quad (16)$$

Решение (16) является стационарной уединенной волной, поскольку

$$C_0 = 0 \text{ и } z = x.$$

СТАЦИОНАРНЫЕ УЕДИНЁННЫЕ ВОЛНЫ УРАВНЕНИЯ (5)

Рассмотрим уравнение (5) при $C_2 = 0$. Уравнение (5) можно записать в виде

$$ww_{zzz} - \delta w_z w_{zz} + ww_z - C_0 w^2 = 0. \quad (17)$$

Используя тот же алгоритм, что и ранее, находим следующие ограничения на параметры уравнения (17)

$$\delta = 1 + \frac{2}{p}, \quad k = \pm \sqrt{\frac{2}{p}}, \quad \lambda = \pm \sqrt{\frac{p}{2}}, \quad C_0 = 0. \quad (18)$$

Решение уравнения (17) выражается формулой

$$y(z) = \frac{Ae^{\pm \sqrt{\frac{p}{2}}(z-z_0)}}{\left(1 + e^{\pm \sqrt{\frac{2}{p}}(z-z_1)}\right)^p}. \quad (19)$$

Решение (19) представляет собой стационарную уединенную волну уравнения (17) при $C_0 = 0$ и $z = x$.

Класс уравнений, к которым применим представленный в статье метод, имеет специальный набор одночленов. Важная особенность этого класса уравнений – наличие в уравнении выражений вида

$$\begin{aligned} E_1 &= yy_{m,z} + ay_z y_{m-1,z} + by_{zz} y_{m-2,z}, \\ y_{n,z} &= \frac{d^n y}{dz^n}, \end{aligned} \quad (20)$$

где m и n – целые числа. Наличие таких одночленов в дифференциальном уравнении приводит к решению с произвольным полюсным порядком дифференциального уравнения, которое находится с помощью представленного выше алгоритма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен метод построения решений нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений. Метод демонстрируется на примере двух нелинейных дифференциальных уравнений (4) и (5). Для уравнений (1) и (2) получены стационарные уединенные волны.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект государственного задания № FSWU-2023-0031).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kudryashov N.A. Method for finding highly dispersive optical solitons of nonlinear differential equations // *Optik*, 2019. V. 206. 163550.
2. Kudryashov N.A. Highly dispersive optical solitons of the generalized nonlinear eight-order Schrödinger equation // *Optik*, 2020. V. 206. 164335.
3. Kudryashov N.A. Exact solutions of the generalized Kuramoto-Sivashinsky equation // *Physics Letters A*, 1990. V. 147. P. 287–291.
4. Parkes E.J., Duffy B.R. An automated tanh-function method for finding solitary wave solutions to non-linear evolution equations // *Computer Physics Communications*, 1996. V. 98. P. 288–300.
5. Malfliet W., Hereman W. The Tanh method: I Exact solutions of nonlinear evolution and wave equations // *Physica Scripta*, 1996. V. 54. P. 563–568.
6. Fan E. Extended tanh-function method and its applications to nonlinear equations // *Physics Letters A*, 2000. V. 227 (4–5). P. 212–218.
7. Fu Z.T., Liu S.K., Liu S.D. et al. New Jacobi elliptic function expansion and new periodic solutions of nonlinear wave equations // *Physics Letters A*, 2001. V. 290 (1–2). P. 72–76.
8. Fu Z.T., Liu S.K., Liu S.D. et al. Jacobi elliptic function expansion method and periodic wave solutions of nonlinear wave equations // *Physics Letters A*, 2001. V. 289 (1–2). P. 69–74.
9. Biswas A. 1-soliton solution of the generalized Radhakrishnan–Kundu–Laksmanan equation // *Physics Letters A*, 2009. V. 373. P. 2546–2548.
10. Vitanov N.K. Application of simplest equations of Bernoulli and Riccati kind for obtaining exact traveling-wave solutions for a class of PDEs with polynomial nonlinearity // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2010. V. 15. № 8. P. 2050–2060.
11. Vitanov N.K. Modified method of simplest equation: Powerful tool for obtaining exact and approximate traveling-wave solutions of nonlinear PDEs // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2011. V. 16. № 3. P. 1176–1185.
12. Vitanov N.K., Dimitrova Z.I., Kantz H. Modified method of simplest equation and its application to nonlinear PDEs // *Applied Mathematics and Computation*, 2010. V. 216. № 9. P. 2587–2595.
13. Kudryashov N.A. One method for finding exact solutions of nonlinear differential equations // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2012. V. 17. P. 2248–2253.
14. Kudryashov N.A. Simplest equation method to look for exact solutions of nonlinear differential equations // *Chaos Soliton Fractals*, 2005. V. 24. P. 1217–1231.
15. Kudryashov N.A. Exact solitary waves of the Fisher equations // *Physics Letters A*, 2005. V. 342. P. 99–106.
16. Kudryashov N.A. Solitary and Periodic Solutions of the Generalized Kuramoto – Sivashinsky Equation // *Regular and Chaotic Dynamics*, 2008. V. 13 (3). P. 234–238.
17. Polyanin A.D., Zaitsev V.F. Handbook of Ordinary Differential Equations: Exact Solutions, Methods, and Problems/ CRC Press, Boca-Raton London, 2018.
18. Kudryashov N.A. Exact solutions of equation for surface waves in a convecting fluid // *Applied Mathematics and Computation*, 2019. V. 344–345. P. 97–106.
19. Kudryashov N.A., Sinelshchikov D.I. Nonlinear waves in bubbly liquids with consideration for viscosity and heat transfer // *Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics*, 2010. V. 374 (19–20). P. 2011–2016.
20. Kudryashov N.A., Sinelshchikov D.I. Equation for the three-dimensional nonlinear waves in liquid with gas bubbles // *Physica Scripta*, 2012. V. 85 (2). P. 025402.
21. Kudryashov N.A. On nonlinear differential equation with exact solutions having various poleorders // *Chaos, Solitons and Fractals*, 2015. V. 75. P. 173–177.
22. Chavy-Waddy P.-C., Kolokolnikov T. A local PDE model of aggregation formation in bacterial colonies // *Nonlinearity*, 2016. V. 29. P. 3174–3185.
23. Alejandro Leon-Ramírez, Oswaldo Gonzalez-Gaxiola, Guillermo Chacon-Acosta. Analytical solutions to the Chavy-Waddy-Kolokolnikov model of bacterial aggregates in phototaxis by three integration schemes // *Mathematics*, 2023. V. 11. P. 2352.
24. Kudryashov N.A., Lavrova S.F. Painlevé test, phase plane analysis and analytical solutions of the Chavy-Waddy-Kolokolnikov model for the description of bacterial colonies // *Mathematics*, 2023. V. 11. P. 3203.

ABOUT ONE CLASS OF DIFFERENTIAL EQUATIONS WITH SOLUTIONS IN THE FORM OF SOLITATED WAVES

N.A. Kudryashov^{1,*}, N.V. Ermolaeva^{1,2}

¹ National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409, Russia

² Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University MEPhI,
Volgodonsk, Rostov region, 347360, Russia

*e-mail: nakudryashov@mephi.ru

Received November 08, 2023; revised November 19, 2023; accepted November 21, 2023

A special class of nonlinear differential equations with solutions in the form of solitary waves is considered. The main feature of these differential equations is that they have a solution in the complex plane with an arbitrary pole order. It is shown that using a modification of the method of simple equations allows one to find exact solutions in the form of solitary waves. The presented method is used to obtain stationary solitary waves to describe processes in a liquid with gas bubbles. Also, this method is used to find stationary solitary waves of bacterial concentration when taking phototaxis into account.

Keywords: nonlinear differential equation; method of simplest equations; solitary wave; liquid with gas bubbles.

REFERENCES

1. Kudryashov N.A. Method for finding highly dispersive optical solitons of nonlinear differential equations. *Optik*, 2019. Vol. 206. 163550.
2. Kudryashov N.A. Highly dispersive optical solitons of the generalized nonlinear eight-order Schrödinger equation. *Optik*, 2020. Vol. 206. 164335.
3. Kudryashov N.A. Exact solutions of the generalized Kuramoto-Sivashinsky equation. *Physics Letters A*, 1990. Vol. 147. Pp. 287–291.
4. Parkes E.J., Duffy B.R. An automated tanh-function method for finding solitary wave solutions to non-linear evolution equations. *Computer Physics Communications*, 1996. Vol. 98. Pp. 288–300.
5. Malfliet W., Hereman W. The Tanh method: I Exact solutions of nonlinear evolution and wave equations. *Physica Scripta*, 1996. Vol. 54. Pp. 563–568.
6. Fan E. Extended tanh-function method and its applications to nonlinear equations // *Physics Letters A*, 2000. Vol. 227 (4–5). Pp. 212–218.
7. Fu Z.T., Liu S.K., Liu S.D. et al. New Jacobi elliptic function expansion and new periodic solutions of nonlinear wave equations. *Physics Letters A*, 2001. Vol. 290 (1–2). Pp. 72–76.
8. Fu Z.T., Liu S.K., Liu S.D. et al. Jacobi elliptic function expansion method and periodic wave solutions of nonlinear wave equations. *Physics Letters A*, 2001. Vol. 289 (1–2). Pp. 69–74.
9. Biswas A. 1-soliton solution of the generalized Radhakrishnan–Kundu–Laksmanan equation. *Physics Letters A*, 2009. Vol. 373. Pp. 2546–2548.
10. Vitanov N.K. Application of simplest equations of Bernoulli and Riccati kind for obtaining exact traveling-wave solutions for a class of PDEs with polynomial nonlinearity. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2010. Vol. 15. No. 8. Pp. 2050–2060.
11. Vitanov N.K. Modified method of simplest equation: Powerful tool for obtaining exact and approximate traveling-wave solutions of nonlinear PDEs. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2011. Vol. 16. No. 3. Pp. 1176–1185.
12. Vitanov N.K., Dimitrova Z.I., Kantz H. Modified method of simplest equation and its application to nonlinear PDEs. *Applied Mathematics and Computation*, 2010. Vol. 216. No. 9. Pp. 2587–2595.
13. Kudryashov N.A. One method for finding exact solutions of nonlinear differential equations. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2012. Vol. 17. Pp. 2248–2253.
14. Kudryashov N.A. Simplest equation method to look for exact solutions of nonlinear differential equations. *Chaos Soliton Fractals*, 2005. Vol. 24. Pp. 1217–1231.
15. Kudryashov N.A. Exact solitary waves of the Fisher equations. *Physics Letters A*, 2005. Vol. 342. Pp. 99–106.
16. Kudryashov N.A. Solitary and Periodic Solutions of the Generalized Kuramoto – Sivashinsky Equation. *Regular and Chaotic Dynamics*, 2008. Vol. 13 (3). Pp. 234–238.
17. Polyanin A.D., Zaitsev V.F. Handbook of Ordinary Differential Equations: Exact Solutions, Methods, and Problems / CRC Press, Boca-Raton London, 2018.
18. Kudryashov N.A. Exact solutions of equation for surface waves in a convecting fluid. *Applied Mathematics and Computation*, 2019. Vol. 344–345. Pp. 97–106.
19. Kudryashov N.A., Sinelshchikov D.I. Nonlinear waves in bubbly liquids with consideration for viscosity

and heat transfer. *Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics*, 2010. Vol. 374 (19–20), Pp. 2011–2016.

20. *Kudryashov N.A., Sinelshchikov D.I.* Equation for the three-dimensional nonlinear waves in liquid with gas bubbles. *Physica Scripta*, 2012. Vol. 85 (2). Pp. 025402.

21. *Kudryashov N.A.* On nonlinear differential equation with exact solutions having various poleorders. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2015. Vol. 75. Pp. 173–177.

22. *Chavy-Waddy P.-C., Kolokolnikov T.* A local PDE model of aggregation formation in bacterial colonies. *Nonlinearity*, 2016. Vol. 29. Pp. 3174–3185.

23. *Alejandro Leon-Ramírez, Oswaldo Gonzalez-Gaxiola, Guillermo Chacon-Acosta.* Analytical solutions to the Chavy-Waddy-Kolokolnikov model of bacterial aggregates in phototaxis by three integration schemes. *Mathematics*, 2023. Vol. 11. P. 2352.

24. *Kudryashov N.A., Lavrova S.F.* Painlevé test, phase plane analysis and analytical solutions of the Chavy-Waddy-Kolokolnikov model for the description of bacterial colonies. *Mathematics*, 2023. Vol. 11. P. 3203.

УДК 517.91

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ ЧАВИ–ВАДДИ–КОЛОКОЛЬНИКОВА

А.А. Кутуков*, Н.А. Кудряшов**

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

*e-mail: alexkutuk@gmail.com

**e-mail: nakudr@gmail.com

Поступила в редакцию 18.11.2023

После доработки: 18.11.2023

Принята к публикации: 23.11.2023

Рассматривается обобщенное уравнение Чави–Вадди–Колокольникова, которое описывает нелинейные физические и биологические процессы, в частности движение бактерий при воздействии раздражителей. Численное исследование модели проводится с использованием псевдоспектрального метода. Для тестирования программы применяются точные решения обобщенного уравнения Чави–Вадди–Колокольникова. Для численного моделирования используются начальные условия в виде периодических и уединенных волн, а также в виде белого шума. Приводятся графики результатов численного моделирования. Показано, что при различных значениях параметров модели происходит формирование периодических структур.

Ключевые слова: обобщенное уравнение Чави–Вадди–Колокольникова; численное моделирование; псевдоспектральный метод.

DOI: 10.26583/vestnik.2023.288

ВВЕДЕНИЕ

Важной задачей является нахождение условий формирования устойчивых периодических структур, описываемых эволюционными нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных. В данной работе при помощи методов численного моделирования исследуется задача для неинтегрируемого нелинейного дифференциального уравнения четвертого порядка, которое используется для описания процессов образования структуры в физических и биологических системах, например при моделировании движения колоний бактерий. Бактерии могут перемещаться под воздействием других бактерий или внешних раздражителей. Внешний раздражитель может быть, например, химический (хемотаксис [6, 7]) или световой (фототаксис [1, 13, 14]). Такое поведение бактерий можно описать с помощью дифференциальных уравнений [2, 6, 7, 11]. В работе [2] было предложено уравнение для описания концентрации бактерий, движение которых зависит от радиуса чувствительности. Это уравнение имеет вид

$$u_t + u_{xx} + u_{xxx} - \alpha \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u_x u_{xx}}{u} \right) = 0, \quad (1)$$

где $u(x, t)$ – функция, описывающая концентрацию бактерий; x и t – независимые переменные; α – параметр математической модели. Уравнение (1) называется уравнением Чави–Вадди–Колокольникова и является непрерывным расширением дискретной модели [5]. В работах [11, 12] проведено аналитическое исследование уравнения (1). В данной работе учитывается дисперсия и рассматривается обобщенное уравнение Чави–Вадди–Колокольникова [10]

$$u_t + u_{xx} + \sigma u_{xxx} + u_{xxxx} - \alpha \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u_x u_{xx}}{u} \right) = 0, \quad (2)$$

где $u(x, t)$ – функция, описывающая концентрацию бактерий; x и t – независимые переменные; α и σ – параметры математической модели. Уравнение (2) не проходит тест Пенлеве и задача Коши для этого уравнения не может быть решена методом обратной задачи рассеяния. Целью данной работы является численное исследование процесса формирования структур, описываемых уравнением (2).

ПСЕВДОСПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД
ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассматривается смешанная краевая задача следующего вида:

$$\begin{aligned} u_t &= L(u) + N(u), \\ u(x, 0) &= u_0(x), \quad u(x, t) = u(x + l, t), \end{aligned} \quad (3)$$

где L – линейный оператор; N – нелинейный оператор; $u_0(x)$ – начальное условие; l – период. Для уравнения (2) имеется

$$\begin{aligned} L(u) &= -u_{xx} \sigma u_{xxx} - u_{xxx}, \\ N(u) &= \alpha \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u_x u_{xx}}{u} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Для численного решения задачи (3) используется псевдоспектральный метод [3, 4, 15]. Применяется преобразование Фурье к задаче (3) и получается следующая задача Коши

$$v_t = \mathcal{L}(u) + \mathcal{N}(u), \quad v(k, 0) = v_0(k), \quad (5)$$

где v , v_0 , $\mathcal{L}$ и $\mathcal{N}$ – преобразования Фурье u , u_0 ; L и N соответственно. Задачу Коши (5) можно решить с помощью метода Рунге-Кутты четвертого порядка с интегрирующим множителем [15]. Используя замену переменных

$$U = v e^{-\mathcal{L}t}, \quad (6)$$

где $e^{-\mathcal{L}t}$ – интегрирующий множитель, получаем после замены переменной (6) задачу

$$U_t = e^{-\mathcal{L}t} \mathcal{N}(U e^{\mathcal{L}t}), \quad U(k, 0) = v_0(k). \quad (7)$$

Интегрирующий множитель позволяет выбирать более крупный шаг по времени при сохранении такой же точности вычислений. Для верификации численного алгоритма в качестве начального условия выбирается точное решение [10]

$$u_{exact} = \frac{C e^{-km(x-\omega t-x_0)}}{(1 + e^{-k(x-\omega t-x_0)})^p}, \quad (8)$$

где C и x_0 – произвольные константы; k , m , p , ω зависят от σ и α [10]. Точное решение (8) найдено в работе [10] с помощью метода простейших уравнений [8] с использованием дифференциального уравнения для логистической функции [9] и линейного дифференциального уравнения первого порядка. Также при $\sigma = 0$ в качестве начального условия выбирается точное решение для стационарного случая уравнения (1)

$$u_{st, exact} = C \left[\operatorname{sech} \left(\frac{\sqrt{\alpha-1}}{2} x \right) \right]^{\frac{2}{\alpha-1}}. \quad (9)$$

Чтобы избежать деления на ноль в численном решении, к начальным условиям вида (8) и (9) добавляется значение $\varepsilon = 10^{-6}$. В качестве погрешности численного решения выбирается

$$\Delta u = \max_i |u_{num}^i - u_{exact}^i|, \quad (10)$$

где u_{num}^i – численное решение в узле пространственной сетки i , а u_{exact}^i – аналитическое решение в узле пространственной сетки i . Зависимость погрешности численного решения от времени для уравнения (2) приводится на рис. 1. Из рисунка видно, что погрешность вычислений не превышает 5×10^{-5} . На рис. 2 показан график погрешности численного решения от времени при $\alpha = 1.5$, $\sigma = 0$. Установлено, что численное решение соответствует точному решению (8), а погрешность при расчетах до времени $t = 100$ не превышает 9.0×10^{-6} .

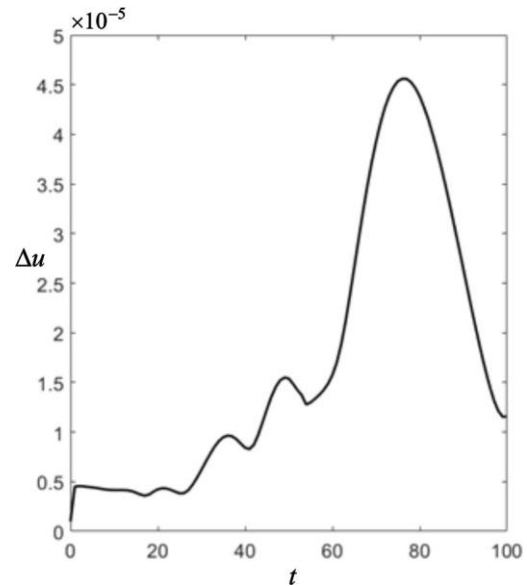


Рис. 1. График погрешности вычислений Δu от времени t при $\alpha = 1.5$, $\sigma = 1$

При выполнении численных экспериментов осуществляется контроль за сохраняющейся величиной $\int_{-\infty}^{\infty} u dx = \text{const}$. При выборе начального условия в виде точного решения (8) относительное изменение сохраняющейся величины не превышало 1.0×10^{-6} за время $t = 1000$. Полученные результаты позволяют сделать вывод о корректной работе численного алгоритма.

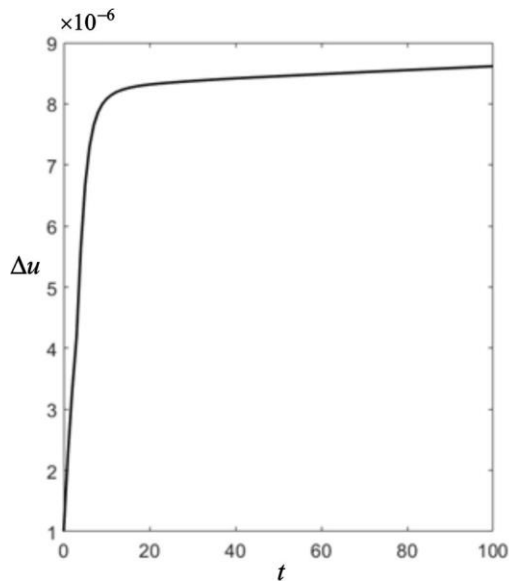


Рис. 2. График погрешности вычислений Δu от времени t при $\alpha = 1.5, \sigma = 0$

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Проведен ряд численных экспериментов с начальным условием в виде белого шума и различными значениями параметров уравнения (2), а также начальным условием в виде уединенных и периодических волн.

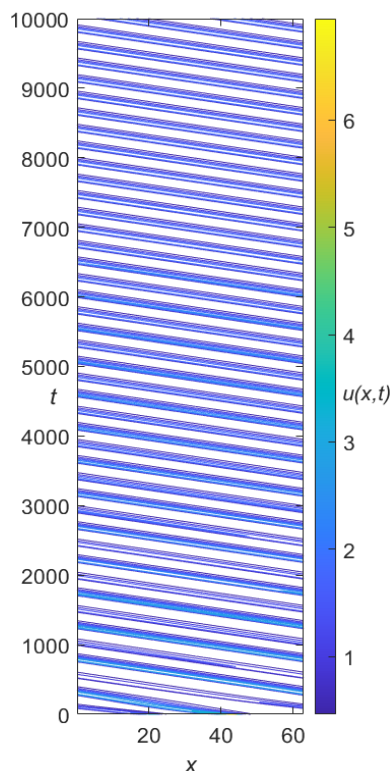


Рис. 3. График численного решения $u(x, t)$ задачи (3)–(4) при $\alpha = 1.5, \sigma = 2.5$ и начальном условии в виде двух уединенных волн различной амплитуды

Результаты численного моделирования задачи (3)–(4) для обобщенной модели Чави–Вадди–Колокольникова (2) показаны на рис. 3–7. Из рис. 3 видно, что две уединенные волны после быстрого изменения формы движутся с одинаковой скоростью и в дальнейшем форму не меняют. На рис. 4 видно, что исходное состояние в виде белого шума со временем трансформируется в несколько одиночных структур.

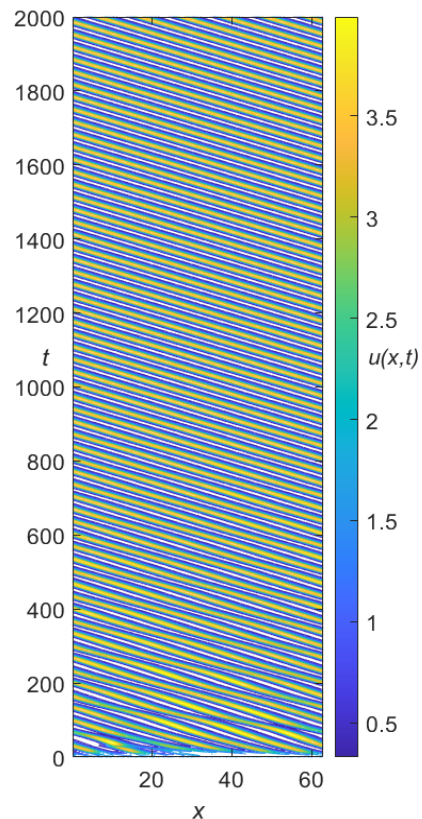


Рис. 4. График численного решения $u(x, t)$ задачи (3)–(4) при $\alpha = 2, \sigma = 1$ и начальном условии в виде белого шума

Структуры, расположенные близко друг к другу, со временем сливаются, образуя структуру большей амплитуды. Этот результат согласуется с результатами, полученными в работе [2]. На рис. 5 также представлено численное решение задачи (3)–(4) с начальным условием в виде белого шума, но при других параметрах математической модели. Из рис. 5 видно, что до момента времени $t = 1250$ скорость движения структур не является постоянной.

На рис. 6 наблюдается процесс перехода от начального условия вида $u(x, 0) = 2\sin^2(x)$ к устойчивым периодическим волнам через несколько промежуточных этапов, которые для наглядности изображены на рис. 7. Процесс перехода к устойчивым периодическим структурам

рам заметен на рис. 6, начиная с момента времени $t = 250$.

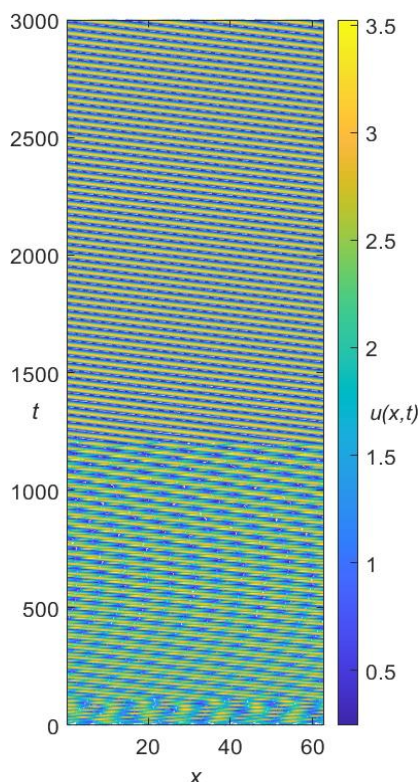


Рис. 5. График численного решения $u(x, t)$ задачи (3)–(4) при $\alpha = 2$, $\sigma = 4$ и начальном условии в виде белого шума

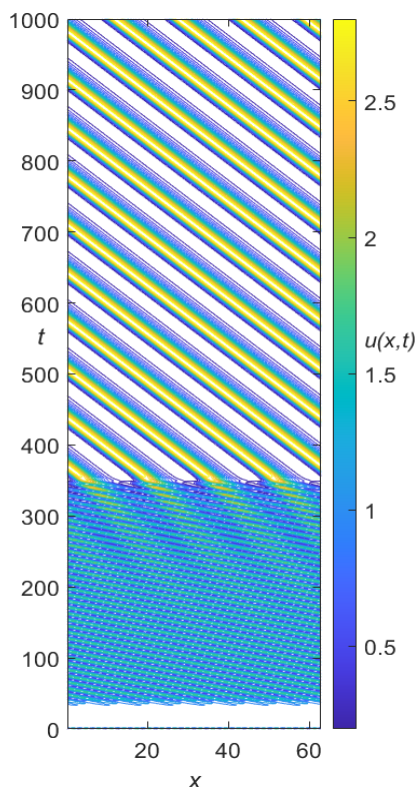


Рис. 6. График численного решения $u(x, t)$ задачи (3)–(4) при $\alpha = 2$, $\sigma = 1.5$ и начальном условии вида $u(x, 0) = 2\sin^2(x)$

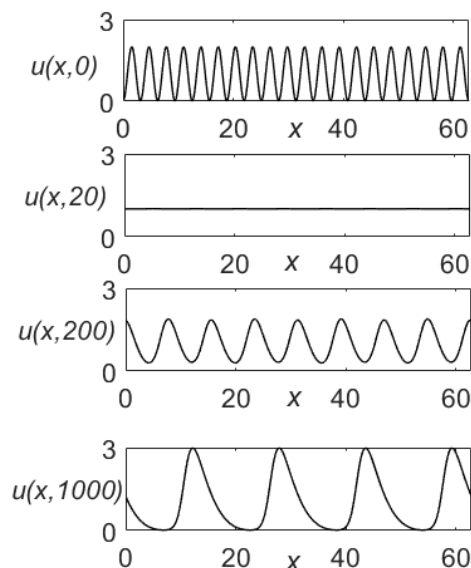


Рис. 7. Графики численного решения $u(x, t)$ задачи (3)–(4) при $\alpha = 2$, $\sigma = 1.5$ и начальном условии в виде белого шума для различных моментов времени

Таким образом, численное решение задачи (3)–(4) показывает, что различные начальные профили волн через некоторое время трансформируются в периодические структуры, движущиеся с постоянной скоростью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследована обобщенная модель Чави–Вадди–Колокольникова. Проведено численное решение задачи, описываемой обобщенным уравнением Чави–Вадди–Колокольникова с периодическими граничными условиями и различными начальными условиями. Верификация программы проведена на точных решениях уравнения (2) и стационарного случая уравнения (1). Обнаружено, что для уравнения (2) белый шум и уединенные волны трансформируются в движущиеся периодические структуры.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-11-00141).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bhaya D., Levy D., Requeijo T. Group dynamics of phototaxis: Interacting stochastic many-particle systems and their continuum limit. *Hyperbolic Problems: Theory, Numerics, Applications* // Springer, 2008. P. 145–159.

2. Chavy-Waddy P.-C., Kolokolnikov T. A local PDE model of aggregation formation in bacterial colonies // *Nonlinearity*, 2016. V. 29(10). P. 3174.
3. Cox S.M., Matthews P.C. Exponential time differencing for stiff systems // *Journal of Computational Physics*, 2002. V. 176(2). P. 430–455.
4. Fornberg B.A. Practical guide to pseudospectral methods // Cambridge university press, 1998.
5. Galante A., Levy D. Modeling selective local interactions with memory // *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2013. V. 260. P. 176–190.
6. Keller E. F., Segel L.A. Model for chemotaxis // *Journal of theoretical biology*, 1971. Vol. 30(2). P. 225–234.
7. Keller E.F., Segel L.A. Traveling bands of chemotactic bacteria: a theoretical analysis // *Journal of theoretical biology*, 1971. V. 30(2). P. 235–248.
8. Kudryashov N.A. Simplest equation method to look for exact solutions of nonlinear differential equations // *Chaos, Solitons & Fractals*, 2005. V. 24(5). P. 1217–1231.
9. Kudryashov N.A. Logistic function as solution of many nonlinear differential equations // *Applied Mathematical Modelling*, 2015. V. 39(18). P. 5733–5742.
10. Kudryashov N.A., Kutukov A.A., Lavrova S.F. Properties of the generalized Chavy–Waddy–Kolokolnikov model for description of bacterial colonies // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2023. Art. No. 107645.
11. Kudryashov N.A., Lavrova S.F. Painlevé Test, Phase Plane Analysis and Analytical Solutions of the Chavy–Waddy–Kolokolnikov Model for the Description of Bacterial Colonies // *Mathematics*, 2023. V. 11(14). P. 3203.
12. León-Ramrez A., González-Gaxiola O., Chacón-Acosta G. Analytical Solutions to the Chavy–Waddy–Kolokolnikov Model of Bacterial Aggregates in Phototaxis by Three Integration Schemes // *Mathematics*, 2023. V. 11(10). P. 2352.
13. Levy D., Requeijo T. Stochastic models for phototaxis // *Bulletin of Mathematical Biology*, 2008. V. 70. P. 1684–1706.
14. Marée A.F.M., Panfilov A.V., Hogeweg P. Phototaxis during the slug stage of *Dictyostelium discoideum*: a model study // *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 1999. V. 266(1426). P. 1351–1360.
15. Trefethen L.N. Spectral methods in MATLAB // SIAM, 2000.

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI», 2023, vol. 12, no. 6, pp. 326–331

NUMERICAL STUDY OF THE GENERALIZED CHAVY–WADDY–KOLOKOLNIKOV MODEL

A.A. Kutukov*, N.A. Kudryashov**

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409, Russia

*e-mail: alexkutuk@gmail.com

**e-mail: nakudr@gmail.com

Received November 18, 2023; revised November 18, 2023; accepted November 23, 2023

The generalized Chavy–Waddy–Kolokolnikov equation is considered, which describes nonlinear physical and biological processes, in particular, the movement of bacteria under the influence of stimuli. Numerical study of the model is carried out using the pseudospectral method. To test the program, exact solutions of the generalized Chavy–Waddy–Kolokolnikov equation are used. For numerical modeling, initial conditions are used in the form of periodic and solitary waves, as well as in the form of white noise. Graphs of the results of numerical simulation are presented. It is shown that at different values of the model parameters, periodic structures are formed.

Keywords: generalized Chavy–Waddy–Kolokolnikov equation; numerical modeling; pseudospectral method.

REFERENCES

1. Bhaya D., Levy D., Requeijo T. Group dynamics of phototaxis: Interacting stochastic many-particle systems and their continuum limit. *Hyperbolic Problems: Theory, Numerics, Applications*. Springer, 2008. Pp. 145–159.
2. Chavy–Waddy P.-C., Kolokolnikov T. A local PDE model of aggregation formation in bacterial colonies. *Nonlinearity*, 2016. Vol. 29(10). Pp. 3174.
3. Cox S.M., Matthews P.C. Exponential time differencing for stiff systems. *Journal of Computational Physics*, 2002. Vol. 176(2). Pp. 430–455.

4. *Fornberg B.* A practical guide to pseudospectral methods. Cambridge university press, 1998.
5. *Galante A., Levy D.* Modeling selective local interactions with memory. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2013. Vol. 260. Pp. 176–190.
6. *Keller E.F., Segel L.A.* Model for chemotaxis. *Journal of theoretical biology*, 1971. Vol. 30(2). Pp. 225–234.
7. *Keller E.F., Segel L.A.* Traveling bands of chemotactic bacteria: a theoretical analysis. *Journal of theoretical biology*, 1971. 30(2). Pp. 235–248.
8. *Kudryashov N.A.* Simplest equation method to look for exact solutions of nonlinear differential equations. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2005. Vol. 24(5). Pp. 1217–1231.
9. *Kudryashov N.A.* Logistic function as solution of many nonlinear differential equations. *Applied Mathematical Modelling*, 2015. Vol. 39(18). Pp. 5733–5742.
10. *Kudryashov N.A., Kutukov A.A., Lavrova S.F.* Properties of the generalized Chavy-Waddy-Kolokolnikov model for description of bacterial colonies. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2023. Art. No. 107645.
11. *Kudryashov N.A., Lavrova S.F.* Painlevé Test, Phase Plane Analysis and Analytical Solutions of the Chavy–Waddy–Kolokolnikov Model for the Description of Bacterial Colonies. *Mathematics*, 2023. Vol. 11(14). Pp. 3203.
12. *León-Ramrez A., González-Gaxiola O., Chacón-Acosta G.* Analytical Solutions to the Chavy-Waddy–Kolokolnikov Model of Bacterial Aggregates in Phototaxis by Three Integration Schemes. *Mathematics*, 2023. Vol. 11(10). Pp. 2352.
13. *Levy D., Requeijo T.* Stochastic models for phototaxis. *Bulletin of Mathematical Biology*, 2008. Vol. 70. Pp. 1684–1706.
14. *Marée A.F.M., Panfilov A.V., Hogeweg P.* Phototaxis during the slug stage of *Dictyostelium discoideum*: a model study. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 1999. Vol. 266(1426). Pp. 1351–1360.
15. *Trefethen L.N.* Spectral methods in MATLAB. SIAM, 2000.

УДК 519.635

УСТОЙЧИВОСТЬ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ОБОБЩЕННОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ШРЕДИНГЕРА ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА С НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ ТРЕТЬЕЙ, ПЯТОЙ, СЕДЬМОЙ И ДЕВЯТОЙ СТЕПЕНЕЙ

А.А. Байрамуков*, Н.А. Кудряшов*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

*e-mail: alim.a.bayramukov@gmail.com

**e-mail: nakudr@gmail.com

Поступила в редакцию 24.11.2023

После доработки: 24.11.2023

Принята к публикации: 28.11.2023

Рассматривается модель нелинейной оптики, описываемая обобщенным уравнением Шрёдингера четвертого порядка с нелинейностями третьей, пятой, седьмой и девятой степеней. Изучается устойчивость точного решения данной модели в виде монохроматической волны. Анализ устойчивости в первом приближении позволяет получить условие неустойчивости точного решения. Метод расщепления по физическим факторам и метод Фурье используются для численного решения математической модели. Проводится анализ устойчивости решения численной модели в виде монохроматической волны, соответствующего точному решению аналитической модели. Получено условие неустойчивости в первом приближении решения численной модели в виде монохроматической волны. Показано, что из условия неустойчивости в первом приближении, полученного для точного решения в виде монохроматической волны, следует выполнение условия неустойчивости численного решения. Предложено условие на временной шаг численного решения, при выполнении которого условия неустойчивости в первом приближении для численного и аналитического решений эквивалентны.

Ключевые слова: обобщенное нелинейное уравнение Шрёдингера; устойчивость; метод расщепления по физическим факторам; метод Фурье.

DOI: 10.26583/vestnik.2023.292

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что нелинейное уравнение Шрёдингера (НУШ) является базовой моделью для описания оптических импульсов в оптическом волокне [1]. Однако в настоящее время в нелинейной оптике предложен ряд обобщений НУШ, расширяющих базовую модель. Особый интерес для исследователей представляют решения обобщенных НУШ в виде уединенных волн – солитонов.

Интерес к солитонным решениям обобщенных НУШ обусловлен замечательными свойствами солитонов базового нелинейного уравнения Шрёдингера: их движение в оптической среде происходит с постоянной скоростью, пропорциональной амплитуде солитона, и без искажения формы, а столкновение двух солитонов подобно упругому столкновению частиц. Эти свойства солитонов НУШ открывают возможность их практического применения в во-

локонно-оптических системах передачи информации [2, 3].

Исследование свойств солитонных решений обобщенных НУШ с учетом процессов, пренебрегаемых в базовой модели, является важной и актуальной задачей. Построение солитонных решений для обобщений НУШ – одно из основных направлений исследований в области нелинейной волоконной оптики [4–10], и большинство работ ограничивается лишь этой задачей. Однако одним из основных свойств солитонов, на котором основывается их практическое использование, является их устойчивость, что требует дополнительного исследования.

Хотя анализ устойчивости точных решений для некоторых нелинейных моделей можно выполнить аналитическими методами [11], для этой цели часто используются численные методы. Это связано с тем, что с увеличением сложности моделей уменьшается область применения и эффективность аналитических методов. Так, одним из распространенных подходов к

исследованию устойчивости решений нелинейных моделей является использование численного моделирования [12–14]. Авторы указанных работ прогнозируют устойчивость точного решения на основе моделирования его поведения при возмущении его начального значения белым шумом. Однако этот подход имеет существенный недостаток: численная модель может сама служить источником неустойчивости численных решений [15]. Таким образом, исследование устойчивости численной модели должно предшествовать проведению численных экспериментов.

Известно, что монохроматическая волна

$$q_c(x, t) = A_0 \exp(i(kx - \omega t - \theta_0)), \quad (1)$$

где

$$\omega = b_4 A_0^8 + b_3 A_0^6 + b_2 A_0^4 + b_1 A_0^2 - a_4 k^4 - a_3 k^3 + a_2 k^2 + a_1 k, \quad (2)$$

является аналитическим решением задачи

$$\begin{aligned} i\partial_t q + (a_4 \partial_x^4 + i a_3 \partial_x^3 + a_2 \partial_x^2 + i a_1 \partial_x) q &= \\ &= (b_1 |q|^2 + b_2 |q|^4 + b_3 |q|^6 + b_4 |q|^8) q, \\ q(x, 0) &= q_0(x), -\infty < x < +\infty, 0 < t, \end{aligned} \quad (3)$$

обобщающей модель, предложенную в [10] для описания распространения фемтосекундных импульсов в нелинейной оптической среде без потерь. В работе [10] были найдены точные решения и законы сохранения модели (3) при $a_1 = a_2 = 0$, но не проведен анализ устойчивости ее решений.

Целью данной работы является исследование устойчивости точного решения в виде монохроматической волны (1) модели (3), а также соответствующего решения численной модели, полученной с помощью метода расщепления по физическим факторам с использованием метода Фурье для решения (3).

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Рассмотрим результат действия малого возмущения $\varepsilon(x, t)$ на решение (1):

$$\tilde{q}_c = A_0 \exp(i(kx - \omega t)) (1 + \varepsilon(x, t)), \quad (4)$$

$$|\varepsilon|^2 \ll 1. \quad (5)$$

Так как

$$\begin{aligned} |1 + \varepsilon|^{2n} &= (1 + \varepsilon)^n (1 + \bar{\varepsilon})^n = \\ &= 1 + n(\varepsilon + \bar{\varepsilon}) + O(|\varepsilon|^2), \quad n = 1, 2, \dots, \end{aligned}$$

подстановка (4) в уравнение (3) с учетом (2) и (5) приводит к линеаризованному дифференциальному уравнению

$$\begin{aligned} i\partial_t \varepsilon + (\tilde{a}_4 \partial_x^4 + i \tilde{a}_3 \partial_x^3 + \tilde{a}_2 \partial_x^2 + i \tilde{a}_1 \partial_x) \varepsilon &= \\ &= \tilde{b}(\varepsilon - \bar{\varepsilon}), \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{a}_4 &= a_4, \quad \tilde{a}_3 = k a_4 + a_3, \\ \tilde{a}_2 &= -(6k^2 a_4 + 3k a_3 - a_2), \\ \tilde{a}_1 &= -(4k^3 a_4 + 3k^2 a_3 - 2k a_2 - a_1), \\ \tilde{b} &= 4A_0^8 b_4 + 3A_0^6 b_3 + 2A_0^4 b_2 + A_0^2 b_1. \end{aligned} \quad (7)$$

Пусть возмущение $\varepsilon(x, t)$ является периодической функцией по x с периодом L . Тогда $\varepsilon(x, t)$ можно представить в виде ряда Фурье:

$$\varepsilon(x, t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \hat{\varepsilon}_n(t) \exp(i\mu_n x), \quad \mu_n = \frac{2\pi n}{L}. \quad (8)$$

Используя метод преобразования Фурье, из (6) получаем систему линейных дифференциальных уравнений для $\hat{\varepsilon}_n(t)$:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\varepsilon}_n \\ \bar{\hat{\varepsilon}}_{-n} \end{bmatrix} = G_n \begin{bmatrix} \hat{\varepsilon}_n \\ \bar{\hat{\varepsilon}}_{-n} \end{bmatrix}, \quad n = -\infty, \dots, +\infty, \quad (9)$$

где

$$G_n = i \begin{bmatrix} G_{11}^{(n)} & G_{12}^{(n)} \\ G_{21}^{(n)} & G_{22}^{(n)} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$G_{11}^{(n)} = \tilde{a}_4 \mu_n^4 + \tilde{a}_3 \mu_n^3 - \tilde{a}_2 \mu_n^2 - \tilde{a}_1 \mu_n - \tilde{b},$$

$$G_{12}^{(n)} = \tilde{b}, \quad G_{21}^{(n)} = -\tilde{b},$$

$$G_{22}^{(n)} = -\tilde{a}_4 \mu_n^4 + \tilde{a}_3 \mu_n^3 + \tilde{a}_2 \mu_n^2 - \tilde{a}_1 \mu_n + \tilde{b}.$$

Собственные значения λ_1, λ_2 матрицы (10) равны

$$\begin{aligned} \lambda_{1,2} &= i(\mu_n^3 \tilde{a}_3 - \mu_n \tilde{a}_1) \pm \\ &\pm \sqrt{(\mu_n^4 \tilde{a}_4 - \mu_n^2 \tilde{a}_2)(-\mu_n^4 \tilde{a}_4 + \mu_n^2 \tilde{a}_2 + 2\tilde{b})}. \end{aligned} \quad (11)$$

Полагая, что параметры уравнения (6) являются вещественными числами, из (7) и (11) получаем, что если выполнено неравенство

$$0 < (\tilde{a}_4 \mu_n^4 - \tilde{a}_2 \mu_n^2) \tilde{b} < 2\tilde{b}^2, \quad (12)$$

то $\pm n$ -ная спектральная компонента возмущения (8) на начальных этапах будет расти экспоненциально.

ненциально, и решение (1) будет неустойчивым. В случае если (12) не выполняется, исследование устойчивости в первом приближении не позволяет сделать вывод об устойчивости решения (1). Таким образом, неравенство (12) представляет собой условие неустойчивости в первом приближении для решения (1) аналитической модели (3).

В следующем разделе рассмотрим применение метода расщепления по физическим факторам с использованием метода Фурье для численного решения аналитической модели (3).

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ (3)

Получим с помощью метода расщепления по физическим факторам с использованием метода Фурье (split-step Fourier method) [15] выражения для численного решения задачи (3). Использование метода Фурье предполагает, что задача имеет периодические граничные условия. Таким образом, метод применим лишь для моделирования периодических решений задачи (3). Однако его также можно использовать для моделирования солитонных решений, если исходную задачу (3) аппроксимировать задачей с периодическими граничными условиями с периодом, существенно превышающим длину волны солитона.

Рассмотрим задачу

$$q_t = iLq + iN(|q|^2)q,$$

$$q(x, 0) = q_0(x), \quad -\frac{L}{2} < x < \frac{L}{2}, \quad 0 < t, \quad (13)$$

$$q(x + L, t) = q(x, t), \quad -\infty < x < +\infty, \quad (14)$$

полученную из (3) добавлением условия (14) периодичности по x решения $q(x, t)$, где

$$L = ia_1 \partial_x + a_2 \partial_x^2 + ia_3 \partial_x^3 + a_4 \partial_x^4, \quad (15)$$

$$N(q) = -(b_1 q + b_2 q^2 + b_3 q^3 + b_4 q^4),$$

– линейный и нелинейный операторы исходной задачи (3).

В методе расщепления по физическим факторам решение $q(x, t)$ задачи (13), (14) аппроксимируется функцией $Q(x, t)$, вычисляемой по формуле [15]

$$Q(x, t + \tau) = \exp(i\tau L) \times \\ \times \exp(i\tau N(|Q(x, t)|^2)) Q(x, t). \quad (16)$$

Вычисление (16) выполняется в два шага путем введения решения на промежуточном шаге $V(x, t)$:

$$V(x, t) = \exp(i\tau N(|Q(x, t)|^2)) Q(x, t), \quad (17)$$

$$Q(x, t + \tau) = \exp(i\tau L) V(x, t). \quad (18)$$

Для вычисления (18) воспользуемся численным приближением дифференциального оператора (15). Для этого введем сеточную функцию

$$Q_j^{(m)} = Q(x_j, m\tau), \quad j = -\frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2},$$

аппроксимирующую $Q(x, m\tau)$ на сетке с шагом h :

$$x_j = jh, \quad h = L/N, \quad j = -\frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2}.$$

Аналогично, $V_j^{(m)}$ – сеточная функция, аппроксимирующая $V(x, m\tau)$.

Если $Q(x, t)$ – периодическая функция по x , то промежуточное решение $V(x, t)$ также периодически, что следует из (17). Следовательно, возможно выполнить преобразование Фурье выражения (18). Ряды Фурье периодических функций $V(x, t)$ и $Q(x, t + \tau)$ аппроксимируются дискретным преобразованием Фурье сеточных функций $V_j^{(m)}$ и $Q_j^{(m+1)}$ [15]:

$$\hat{Q}_n^{(m+1)} = \exp(i\tau \hat{L}_n) \hat{V}_n^{(m)}, \\ n = -\frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2} - 1, \quad (19)$$

где

$$\hat{A}_n = \frac{h}{L} \sum_{j=-N/2}^{N/2-1} A_j \exp(-i\mu_n x_j),$$

– дискретное преобразование Фурье,

$$\hat{L}_n = a_4 \mu_n^4 + a_3 \mu_n^3 - a_2 \mu_n^2 - a_1 \mu_n,$$

где

$$\mu_n = \frac{2\pi n}{L}.$$

Наконец, из (17) и (19) имеем:

$$V_j^{(m)} = \exp\left(i\tau N(|Q_j^{(m)}|^2)\right) \cdot Q_j^{(m)}, \quad (20)$$

$$Q_j^{(m+1)} = \\ = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \hat{V}_n^{(m)} \exp(i(\tau \hat{L}_n + \mu_n x_j)). \quad (21)$$

Формулы (20) и (21) с начальным условием

$$Q_j^{(0)} = q_0(x_j), \quad j = -\frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2} - 1, \quad (22)$$

позволяют численно решить задачу (13), (14).

В следующем разделе исследуется устойчивость в первом приближении решения численной модели (20), (21), (22) в виде монохроматической волны.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

Рассмотрим сеточную функцию

$$Q_{cj}^{(m)} = A_0 \exp(i(kx_j - \omega m \tau)),$$

$$j = -\frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2} - 1, \quad (23)$$

соответствующую решению (1) в виде монохроматической волны при $\theta_0 = 0$.

Решение (23) периодически с периодом $L = 2\pi/k$.

Исследуем устойчивость в первом приближении решения (23). Возмущенное решение (23) дано выражением

$$Q_j^{(m)} = Q_{cj}^{(m)} (1 + \varepsilon_j^{(m)}),$$

$$j = -\frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2} - 1, \quad (24)$$

где сеточная функция $\varepsilon_j^{(m)}$ – малое возмущение. Предположим, что $\varepsilon_j^{(m)}$ периодически с периодом L , и $|\varepsilon_j^{(m)}| \ll 1$.

Согласно (20), имеем

$$V_j^{(m)} = \exp\left(i\tau \mathcal{N}\left(A_0^2 |1 + \varepsilon_j^{(m)}|^2\right)\right) \times$$

$$\times Q_{cj}^{(m)} (1 + \varepsilon_j^{(m)}). \quad (25)$$

Используя разложение в ряд Тейлора и условие малости возмущения $\varepsilon_j^{(m)}$, получим

$$i\mathcal{N}\left(A_0^2 |1 + \varepsilon_j^{(m)}|^2\right) \approx$$

$$\approx \mathcal{N}\left(A_0^2 (1 + \varepsilon_j^{(m)} + \bar{\varepsilon}_j^{(m)})\right) \approx$$

$$\approx \mathcal{N}(A_0^2) + A_0^2 \mathcal{N}'(A_0^2) (\varepsilon_j^{(m)} + \bar{\varepsilon}_j^{(m)}) =$$

$$= \mathcal{N}(A_0^2) - \tilde{b} (\varepsilon_j^{(m)} + \bar{\varepsilon}_j^{(m)}), \quad (26)$$

где $\mathcal{N}'(q) = \frac{d}{dq} \mathcal{N}(q)$, и $\tilde{b}$ определено в (7).

Из (25) и (26) следует

$$V_j^{(m)} \approx Q_j^{*(m)} (1 + E_j^{(m)}), \quad (27)$$

где

$$Q_j^{*(m)} = \exp(i\tau \mathcal{N}(A_0^2)) \cdot Q_{cj}^{(m)},$$

$$E_j^{(m)} = (1 - i\tau \tilde{b}) \varepsilon_j^{(m)} - i\tau \tilde{b} \bar{\varepsilon}_j^{(m)}. \quad (28)$$

Применив ДПФ к (28), получим

$$\widehat{Q}_n^{*(m)} = \begin{cases} 0, & n \neq 1, \\ A_0 \exp(i\tau (\mathcal{N}(A_0^2) - \omega m)) & n = 1, \end{cases}$$

$$\widehat{E}_n^{(m)} = (1 - i\tau \tilde{b}) \widehat{\varepsilon}_n^{(m)} - i\tau \tilde{b} \widehat{\varepsilon}_{-n}^{(m)},$$

откуда для спектральных компонент (27) следует

$$\widehat{V}_n^{(m)} = \frac{1}{N} \begin{cases} \widehat{Q}_1^{*(m)} \widehat{E}_{[n-1]}^{(m)}, & n \neq 1, \\ \widehat{Q}_1^{*(m)} (N + \widehat{E}_0^{(m)}), & n = 1. \end{cases} \quad (29)$$

где

$$[n-1] = \begin{cases} n-1 & n > -N/2, \\ N/2-1, & n = -N/2. \end{cases}$$

Согласно (21) и (29), значение сеточной функции (24) на следующем временном слое равно

$$\widehat{Q}_1^{(m+1)} = \frac{1}{N} \widehat{Q}_{c1}^{(m+1)} (N + \widehat{E}_0^{(m)}), \quad (30)$$

$$\widehat{Q}_n^{(m+1)} = \frac{1}{N} \exp(i\tau (\widehat{\mathcal{L}}_n - \widehat{\mathcal{L}}_1)) \widehat{Q}_{c1}^{(m+1)} \widehat{E}_{[n-1]}^{(m)},$$

$$n \neq 1,$$

поскольку $\widehat{Q}_1^{*(m)} \exp(i\tau \widehat{\mathcal{L}}_1) = \widehat{Q}_{c1}^{(m+1)}$, что следует из (2) и (23).

С другой стороны, применив ДПФ к (24), имеем

$$\widehat{Q}_1^{(m+1)} = \frac{1}{N} \widehat{Q}_{c1}^{(m+1)} \widehat{\varepsilon}_{[n-1]}^{(m+1)}, \quad (31)$$

$$\widehat{Q}_n^{(m+1)} = \widehat{Q}_{c1}^{(m+1)} (N + \widehat{\varepsilon}_0^{(m+1)}), \quad n \neq 1,$$

Сравнение (30) и (31) дает выражение для вычисления спектральных компонент возмущения $\varepsilon^{(m)}$ на следующем временном слое в первом приближении:

$$\begin{bmatrix} \widehat{\varepsilon}_n^{(m+1)} \\ \widehat{\varepsilon}_{-n}^{(m+1)} \end{bmatrix} = H_n \begin{bmatrix} \widehat{\varepsilon}_n^{(m)} \\ \widehat{\varepsilon}_{-n}^{(m)} \end{bmatrix}, \quad n = -\infty, \dots, +\infty, \quad (32)$$

где

$$H_n = i \begin{bmatrix} H_{11}^{(n)} & H_{12}^{(n)} \\ H_{21}^{(n)} & H_{22}^{(n)} \end{bmatrix}, \quad (33)$$

$$H_{11}^{(n)} = (1 - i\tau \tilde{b}) \exp(i\tau \widehat{\mathcal{D}}_n),$$

$$H_{12}^{(n)} = -i\tau \tilde{b} \exp(i\tau \widehat{\mathcal{D}}_n),$$

$$H_{21}^{(n)} = i\tau\tilde{b} \exp(-i\tau\hat{\mathcal{D}}_{-n}),$$

$$H_{22}^{(n)} = (1 + i\tau\tilde{b}) \exp(-i\tau\hat{\mathcal{D}}_{-n})$$

и

$$\begin{aligned} \hat{\mathcal{D}}_n &= \hat{\mathcal{L}}_{n+1} - \hat{\mathcal{L}}_1 = \\ &= \tilde{a}_4\mu_n^4 + \tilde{a}_3\mu_n^3 - \tilde{a}_2\mu_n^2 - \tilde{a}_1\mu_n, \end{aligned} \quad (34)$$

где $\tilde{a}_i$ определены в (7). Равенство (32) представляет собой дискретный аналог линеаризованной системы дифференциальных уравнений (9).

Заметим, что (34) можно представить как сумму четной и нечетной функций от n :

$$\hat{\mathcal{D}}_n = \hat{\mathcal{D}}_n^+ + \hat{\mathcal{D}}_n^-, \quad (35)$$

где

$$\hat{\mathcal{D}}_n^+ = \tilde{a}_4\mu_n^4 - \tilde{a}_2\mu_n^2, \quad \hat{\mathcal{D}}_n^- = \tilde{a}_3\mu_n^3 - \tilde{a}_1\mu_n$$

и

$$\hat{\mathcal{D}}_n^+ = \hat{\mathcal{D}}_n^+, \quad \hat{\mathcal{D}}_n^- = -\hat{\mathcal{D}}_n^-.$$

Далее, из (35) и (33) следует

$$H_n = \exp(i\tau\hat{\mathcal{D}}_n^-) \begin{bmatrix} H'_{11}^{(n)} & H'_{12}^{(n)} \\ H'_{21}^{(n)} & H'_{22}^{(n)} \end{bmatrix}, \quad (36)$$

$$H'_{11}^{(n)} = (1 - i\tau\tilde{b}) \exp(i\tau\hat{\mathcal{D}}_n^+),$$

$$H'_{12}^{(n)} = -i\tau\tilde{b} \exp(i\tau\hat{\mathcal{D}}_n^+),$$

$$H'_{21}^{(n)} = i\tau\tilde{b} \exp(-i\tau\hat{\mathcal{D}}_n^+),$$

$$H'_{22}^{(n)} = (1 + i\tau\tilde{b}) \exp(-i\tau\hat{\mathcal{D}}_n^+).$$

Собственные значения (36) равны

$$\lambda_n^{(1,2)} = \beta_n \pm \sqrt{\beta_n^2 - 1}, \quad (37)$$

где

$$\beta_n = \cos(\tau\hat{\mathcal{D}}_n^+) + \tau\tilde{b} \sin(\tau\hat{\mathcal{D}}_n^+). \quad (38)$$

Поведение n -ной спектральной компоненты возмущения $\varepsilon_j^{(m)}$ в начальных этапах определяется модулями собственных значений (37) матрицы (36). Предположим, что коэффициенты (7) являются вещественными числами. Тогда, согласно (38), β_n тоже является вещественным числом, и возможны два различных случая. Если $|\beta_n| \leq 1$, исследование устойчивости в первом приближении не позволяет сделать вывод об устойчивости решения (23), поскольку имеет место $|\lambda_n^{(1,2)}| = 1$. Если же $|\beta_n| > 1$, то $|\lambda_n^{(1)}| > 1$ или $|\lambda_n^{(2)}| > 1$, и решение (23) неустойчиво. Так, с учетом (38), условие неустойчивости решения (23) можно записать в виде

$$|\cos(\tau\hat{\mathcal{D}}_n^+) + \tau\tilde{b} \sin(\tau\hat{\mathcal{D}}_n^+)| > 1,$$

что эквивалентно [15]

$$|\cos(\tau\hat{\mathcal{D}}_n^+ - \theta_0)| > \cos \theta_0, \quad (39)$$

где θ_0 определяется через

$$\cos \theta_0 = \frac{1}{\sqrt{1 + \tau^2 \tilde{b}^2}}, \quad \sin \theta_0 = \frac{\tau\tilde{b}}{\sqrt{1 + \tau^2 \tilde{b}^2}},$$

причем $0 < \theta_0 < \pi/2$, если $\tilde{b} > 0$, и $-\pi/2 < \theta_0 < 0$, если $\tilde{b} < 0$.

Для упрощения (39), введем функцию непрерывного аргумента μ [15]

$$g(\mu^2) = \tilde{a}_4\mu^4 - \tilde{a}_2\mu^2,$$

для которой $g(\mu_n^2) = \hat{\mathcal{D}}_n^+$. Тогда можно рассмотреть левую часть неравенства (39) как непрерывную периодическую функцию непрерывного аргумента $g(\mu^2)$:

$$|\cos(\tau g(\mu^2) - \theta_0)| > \cos \theta_0. \quad (40)$$

Обозначив

$$g_p = \frac{\theta_0 + p\pi}{\tau}, \quad p \in \mathbb{Z},$$

точки перегиба функции в левой части неравенства (40), условие (40) можно записать как [15]

$$\tau|g(\mu_n^2) - g_p| < |\theta_0|, \quad p \in \mathbb{Z}. \quad (41)$$

Умножив (41) на $\tilde{b}$, поскольку $\theta_0\tilde{b} > 0$, получим

$$-\theta_0\tilde{b} < (\tau g(\mu_n^2) - \theta_0 - p\pi)\tilde{b} < \theta_0\tilde{b}, \quad p \in \mathbb{Z}. \quad (42)$$

Для $p = 0$, используя разложение θ_0 в ряд Тейлора, из (42) имеем

$$0 < (\tilde{a}_4\mu_n^4 - \tilde{a}_2\mu_n^2)\tilde{b} < 2\tilde{b}^2 + O(\tau). \quad (43)$$

Условие (43) при $\tau \rightarrow 0$ соответствует условию неустойчивости (12), полученному для монохроматического решения аналитической модели. Следовательно, условие (42) при $p = 0$ отражает естественную неустойчивость модели (3). Напротив, условие (42) при $p \neq 0$ не имеет соответствия в аналитической модели и отражает неустойчивость исключительно численной природы. Таким образом, из выполнения условия (42) неустойчивости в первом приближении численного решения в виде монохроматической волны не следует выполнение условия (12).

Поскольку n в (32) принимает ограниченные значения, то и значения $g(\mu_n^2) = \widehat{\mathcal{D}}_n^+$ будут ограничены. Подбирая такое достаточно малое τ , что

$$-(\pi - \theta) < \tau g(\mu_n^2) + |\theta| < \pi - \theta, \quad (44)$$

$$n = -\frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2} - 1,$$

можно предотвратить выполнение условия неустойчивости (42) при $p \neq 0$. В таком случае условие неустойчивости в первом приближении численного решения (23) совпадает с условием неустойчивости в первом приближении решения (1) аналитической модели. При этом следует иметь в виду, что соответствующее значение τ необходимо, но не достаточно для устойчивости численного решения (23), поскольку, во-первых, остается условие (43), соответствующее условию неустойчивости аналитического решения, и во-вторых, условие неустойчивости (42) было получено лишь в первом приближении, и из него не следует устойчивость решения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ устойчивости в первом приближении относительно решения (1) модели (3) позволил получить следующие результаты.

Получены условия неустойчивости в первом приближении для решения (1) аналитической модели (3) и решения (23) численной модели (20), (21), (22), построенной с помощью метода разложения по физическим факторам с использованием метода Фурье.

Показано, что из выполнения условия (12) неустойчивости в первом приближении, полученного для аналитического решения (1), следует выполнение условия (42) неустойчивости в первом приближении решения (23) численной модели (20), (21), (22). Однако обратное не верно, и условие (42) в общем случае не эквивалентно условию (12) неустойчивости в первом приближении решения (1).

Представлено условие (44) для шага по времени τ численной модели, при выполнении которого условия неустойчивости (42) и (12) будут эквивалентны.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-11-00141).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boyd R.W. Nonlinear Optics. Elsevier Science & Technology Books, 2008.
2. Hasegawa A., Kodama Y. Signal transmission by optical solitons in monomode fiber // Proceedings of the IEEE, 1981. V. 69. № 9. P. 1145–1150.
3. Blow K.J., Doran N.J. High bit rate communication systems using non-linear effects // Optics Communications, 1982. V. 42. № 6. P. 403406.
4. Triki H. et al. Chirped solitary pulses for a nonic nonlinear Schrödinger equation on a continuous-wave background // Physical Review A, 2016. V. 93. № 6. P. 063810.
5. Biswas A. et al. Highly dispersive optical solitons with kerr law nonlinearity by extended Jacobi's elliptic function expansion // Optik, 2019. V. 183. P. 395–400.
6. Hussain Q., Zaman F.D., Kara A.H. Invariant analysis and conservation laws of time fractional Schrödinger equations // Optik, 2020. V. 206. P. 164356.
7. Kudryashov N.A. Highly dispersive optical solitons of equation with various polynomial nonlinearity law // Chaos, Solitons & Fractals, 2020. V. 140. P. 110202.
8. Biswas A. 1-soliton solution of the generalized Radhakrishnan, Kundu, Lakshmanan equation // Physics Letters A, 2009. V. 373. № 30. P. 2546–2548.
9. Kudryashov N.A. Highly dispersive optical solitons of the generalized nonlinear eighth-order Schrödinger equation // Optik, 2020. V. 206. P. 164335.
10. Kudryashov N.A. et al. Cubic–quartic optical solitons and conservation laws having cubic–quintic–septic–nonic self-phase modulation // Optik, 2022. V. 269. P. 169834.
11. Seadawy A.R., Lu D. Bright and dark solitary wave soliton solutions for the generalized higher order nonlinear Schrödinger equation and its stability // Results in Physics, 2017. V. 7. P. 43–48.
12. He J.-R., Li H.-M. Analytical solitary-wave solutions of the generalized nonautonomous cubic–quintic nonlinear Schrödinger equation with different external potentials // Physical Review E, 2011. V. 83. № 6. P. 066607.
13. Hambli N. et al. q-Deformed solitary pulses in the higher-order nonlinear Schrödinger equation with cubic–quintic nonlinear terms // Optik, 2022. V. 268. P. 169724.
14. Kruglov V.I., Triki H. Propagation of periodic and solitary waves in a highly dispersive cubic–quintic medium with self-frequency shift and self-steepening nonlinearity // Chaos, Solitons & Fractals, 2022. V. 164. P. 112704.
15. Weideman J., Herbst B. Split-step methods for the solution of the non-linear Schrödinger equation // SIAM Journal on Numerical Analysis, 1986. V. 23. № 3. P. 485–507.

STABILITY OF THE NUMERICAL SOLUTION OF THE FOURTH ORDER GENERALIZED NONLINEAR SCHRÖDINGER EQUATION WITH CUBIC-QUINTIC-SEPTIC-NONIC NONLINEARITY

A.A. Bayramukov*, N.A. Kudryashov**

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409, Russia

*e-mail: alim.a.bayramukov@gmail.com

**e-mail: nakudr@gmail.com

Received November 24, 2023; revised November 24; accepted November 28

A model of nonlinear optics described by the generalized fourth-order Schrödinger equation with nonlinearities of the third, fifth, seventh and ninth degrees is considered. An analysis of the stability in the first approximation of the exact solution of this model in the form of a monochromatic wave is carried out. Analysis of stability in the first approximation allows us to obtain the condition for the instability of the exact solution. The split-step Fourier method is used to numerically solve the model. An analysis of the stability in the first approximation of the solution of the numerical model in the form of a monochromatic wave corresponding to the exact solution of the analytical model is carried out. The instability condition in the first approximation of the solution of the numerical model in the form of a monochromatic wave is derived. It is demonstrated that from the fulfillment of the instability condition in the first approximation, obtained for the exact solution in the form of a monochromatic wave, the fulfillment of the instability condition for the numerical solution follows, while the converse is not true. A condition is given for the time step of the numerical model, under which the instability conditions in the first approximation for the numerical and analytical solutions coincide.

Keywords: generalized nonlinear Schrödinger equation, stability, split-step Fourier method.

REFERENCES

1. Boyd R.W. Nonlinear Optics. Elsevier Science & Technology Books, 2008.
2. Hasegawa A., Kodama Y. Signal transmission by optical solitons in monomode fiber. Proceedings of the IEEE 1981. Vol. 69. No. 9. Pp. 1145–1150.
3. Blow K.J., Doran N.J. High bit rate communication systems using non-linear effects. Optics Communications, 1982. Vol. 42, No. 6. P. 403406.
4. Triki H. et al. Chirped solitary pulses for a nonic nonlinear Schrödinger equation on a continuous-wave background. Physical Review A, 2016. Vol. 93. No. 6. P. 063810.
5. Biswas A. et al. Highly dispersive optical solitons with kerr law nonlinearity by extended Jacobi's elliptic function expansion. Optik, 2019. Vol. 183. Pp. 395–400.
6. Hussain Q., Zaman F.D., Kara A.H. Invariant analysis and conservation laws of time fractional Schrödinger equations. Optik, 2020. Vol. 206. P. 164356.
7. Kudryashov N.A. Highly dispersive optical solitons of equation with various polynomial nonlinearity law. Chaos, Solitons & Fractals, 2020. Vol. 140. P. 110202.
8. Biswas A. 1-soliton solution of the generalized Radhakrishnan, Kundu, Lakshmanan equation. Physics Letters A, 2009. Vol. 373. No. 30. Pp. 2546–2548.
9. Kudryashov N.A. Highly dispersive optical solitons of the generalized nonlinear eighth-order Schrödinger equation. Optik, 2020. Vol. 206. Pp. 164335.
10. Kudryashov N.A. et al. Cubic–quartic optical solitons and conservation laws having cubic–quintic–septic–nonic self-phase modulation. Optik, 2022. Vol. 269. Pp. 169834.
11. Seadawy A.R., Lu D. Bright and dark solitary wave soliton solutions for the generalized higher order nonlinear Schrödinger equation and its stability. Results in Physics, 2017. Vol. 7. Pp. 43–48.
12. He J.-R., Li H.-M. Analytical solitary-wave solutions of the generalized nonautonomous cubic-quintic nonlinear Schrödinger equation with different external potentials. Physical Review E, 2011. Vol. 83. No. 6. P. 066607.
13. Hambli N. et al. q-Deformed solitary pulses in the higher-order nonlinear Schrödinger equation with cubic-quintic nonlinear terms. Optik, 2022. Vol. 268. P. 169724.
14. Kruglov V.I., Triki H. Propagation of periodic and solitary waves in a highly dispersive cubic–quintic medium with self-frequency shift and self-steepening nonlinearity. Chaos, Solitons & Fractals, 2022. Vol. 164. Pp. 112704.
15. Weideman J., Herbst B. Split-step methods for the solution of the non-linear Schrödinger equation. SIAM Journal on Numerical Analysis, 1986. Vol. 23. No. 3. Pp. 485–507.

УДК 004.94

СРЕДСТВА ЭЛЕКТРОННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ИНЖЕНЕРИИ

Н.Е. Сидоров^{1,*}, Е.Б. Весна^{2,**}, К.В. Клыгина^{1,***},
Ю.А. Панебратцев^{1,****}, Г.В. Тихомиров^{2,*****}

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия,

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, 115409, Россия

*e-mail: nikita@jinr.ru

**e-mail: ebvesna@mephi.ru

***e-mail: klygina@jinr.ru

****e-mail: yuri@intergraphics.ru

*****e-mail: gvtikhomirov@mephi.ru

Поступила в редакцию 10.11.2023

После доработки: 22.11.2023

Принята к публикации: 28.11.2023

В современных условиях процесс обучения происходит в различных формах. Наряду с традиционными формами обучения развиваются и новые формы дистанционного и смешанного обучения. Возможности современных информационных технологий позволяют широко использовать онлайн-курсы, специализации, разработанные в различных университетах и ведущих компаниях, развивающих новые технологии. Обучение приобрело международный характер. Большое значение приобрели различные платформы массовых открытых онлайн-курсов (МООК), в том числе и Национальная платформа открытого образования. Многие курсы по современной ядерной физике и инженерии разрабатываются в сотрудничестве с ведущими научными центрами и Госкорпорацией «Росатом». В статье представлена информация о сотрудничестве крупного международного научного центра Объединенного Института ядерных исследований и Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» при участии университетов Болгарии, Монголии, Вьетнама, Египта, Сербии и ЮАР. Такое сотрудничество направлено на создание открытой информационной и образовательной среды для поддержки фундаментальных и прикладных исследований, онлайн-курсов для международных и национальных платформ, виртуальных лабораторных практикумов по ядерной физике и ядерной электронике. Наряду с онлайн-обучением в статье приводятся данные по организации исследовательских практик и мастер-классов для студентов и школьников старших классов из разных стран, в том числе из Египта, Мексики, Индии, Вьетнама, ЮАР. Несмотря на то, что учебные материалы по ядерной физике и связанным с ней технологиям востребованы относительно узким кругом студентов и молодых специалистов, наш анализ использования курсов показал, что они имеют широкую аудиторию в мире, в том числе в странах, сотрудничающих с ОИЯИ, НИЯУ МИФИ и Госкорпорацией «Росатом». Разработанные виртуальные лабораторные практикумы по основам экспериментальной ядерной физики уже используются в университетах многих стран мира.

Ключевые слова: онлайн-курс; ядерная физика; виртуальная лаборатория; практический практикум; материаловедение; науки о жизни.

DOI: 10.26583/vestnik.2023.291

ВВЕДЕНИЕ

Ядерная физика – одна из самых сложных областей современной науки, поэтому для подготовки специалистов нужны годы учебы и практики. Между тем, ядерная физика и ядерные технологии уже стали неотъемлемой частью нашей жизни: ядерная энергетика, ядерная медицина, ядерные технологии в археологии, геологии, экологии, планетологии и астробиологии. С одной стороны, потребность в специалистах в этих областях растет на разных континентах. С другой стороны, круг исследо-

вательских центров и университетов, разрабатывающих ядерные технологии, весьма ограничен. При этом, новейшие результаты таких исследований должны своевременно внедряться в учебный процесс. Необходимо, чтобы в создании учебных материалов участвовали ученые и инженеры, принимающие непосредственное участие в этих фундаментальных и прикладных исследованиях [1].

Например, сегодня во всем мире большое внимание уделяется переходу на новые безуглеродные источники энергии. В перспективе развитие ядерно-физических технологий по-

зволит создать экологически чистые ядерные (замкнутый ядерный цикл) и термоядерные источники энергии.

Стоит отметить, что до сих пор все крупные исследовательские проекты являются международными и разрабатываются в международных исследовательских центрах, с которыми сотрудничают национальные университеты. Это Европейская организация по ядерным исследованиям (ЦЕРН, Женева), которая в настоящее время продолжает сотрудничество с Россией, Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна) и проект Международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР в Исследовательском центре Кадараш (Франция) с участием Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Как правило, исследовательские центры участвуют в университетском образовании, организуя различные студенческие практики, летние школы и конференции, а также предоставляют студентам возможность реализовать свои первые исследовательские проекты [2].

В данной статье мы хотели бы представить результаты сотрудничества Международного научного центра ОИЯИ с Национальным исследовательским ядерным университетом «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), Научно-исследовательским центром iThemba LABS (ЮАР), Софийским университетом им. Св. Климента Охридского (Болгария), Институтом ядерной физики и энергетики Болгарской академии наук (Болгария), Университетом города Нови-Сад (Сербия) и Центром естественного образования NEMDA (Израиль) в области создания открытой информационной и образовательной среды для изучения ядерной физики и смежных технологий.

Объединенный институт ядерных исследований – международный научный центр, объединяющий 16 государств-членов и пять ассоциированных членов, где построены и строятся уникальные базовые установки и проводятся исследования по наиболее актуальным научным направлениям. К таким направлениям относятся исследования конденсированного состояния вещества в импульсном реакторе на быстрых нейтронах; поиск новых сверхтяжелых элементов; исследования в области астробиологии, ядерной планетологии и физики нейтрино. В настоящее время в Дубне строится сверхпроводящий коллайдер релятивистских ядер NICA, предназначенный для изучения сверхплотной ядерной материи.

НИЯУ МИФИ – ведущий инженерно-физический вуз России, осуществляющий подготовку по следующим направлениям:

- «Ядерная физика и технологии»;
- «Лазерные и плазменные технологии»;
- «Инженерная физика для биомедицины»;
- «Нанотехнологии в электронике, спинтронике и фотонике»;
- «Интеллектуальные киберсистемы и кибербезопасность»;
- «Бизнес-информатика и управление сложными системами».

НИЯУ МИФИ имеет 14 филиалов в различных городах Российской Федерации, филиалы в Республике Узбекистан и Республике Казахстан. В Университете обучаются более 12 тысяч студентов, из них около 1500 – иностранцы. НИЯУ МИФИ поддерживает партнерские отношения с более чем 90 университетами и организациями из 25 стран мира. С 2016 года НИЯУ МИФИ активно занимается разработкой онлайн-курсов для MOOC-платформ.

Свыше 30 лет в ОИЯИ действует Учебно-научный центр, организующий работу со студентами различных вузов, в том числе студентами НИЯУ МИФИ. В состав Учебно-научного центра ОИЯИ входят базовые кафедры НИЯУ МИФИ. Несколько лет назад сотрудничество ОИЯИ и НИЯУ МИФИ приобрело новый виток – это совместная разработка онлайн-курсов и других интерактивных мультимедийных инструментов обучения. Разработанные учебные материалы в зависимости от их назначения были размещены на международных и национальных MOOC-платформах, на образовательных порталах ОИЯИ и НИЯУ МИФИ. Это позволило расширить географию и сделать новые учебные материалы доступными не только для студентов вузов России и государств-партнеров, но и всего мира. Информация, ранее полученная с платформ Coursera и edX, позволила сделать вывод о том, что к разработанным курсам проявили интерес более 300 000 студентов из более чем 100 стран.

Возможно, этот интерес вызван тем, что тесное сотрудничество ученых и инженеров исследовательских центров, профессоров вузов, методистов, дизайнеров и программистов позволяет создавать принципиально новые учебные ресурсы, сочетающие преимущества традиционного подхода к обучению с преимуществами современных информационных и коммуникационных технологий.

ЭЛЕКТРОННЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ НИЯУ МИФИ

На сегодняшний день Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» имеет несколько направлений развития ресурсов электронного обучения:

- разработка онлайн-курсов и специализаций для международных MOOC-платформ;
- разработка онлайн-курсов для Национальной платформы открытого образования и платформы «Универсариум»;
- развитие Образовательного портала НИЯУ МИФИ, включающего как открытые образовательные ресурсы, так и курсы электронного обучения для студентов НИЯУ МИФИ, обучающихся не только в Москве, но и в филиалах Университета;
- участие в развитии Платформы киберобучения для ядерного образования и подготовки кадров CLP4NET (МАГАТЭ);
- разработка совместных (сетевых) образовательных программ;
- разработка виртуальных лабораторий;
- развитие Сетевой школы НИЯУ МИФИ;
- разработка сайта Международных олимпиад НИЯУ МИФИ для студентов, аспирантов и стажеров.

В качестве примеров совместной работы НИЯУ МИФИ с различными партнерами можно привести следующие онлайн-курсы:

- «Ускорительный комплекс NICA – проект класса мегасайенс» (совместно с ОИЯИ);

- «Физика тяжелых ионов» (совместно с ОИЯИ);

- «Fundamentals of Modern Russian-designed NPPs with VVER-12002 (совместно с АО «Росатом Сервис»);

- «Construction and operation of pumps for nuclear power plants» (совместно с Ивановским государственным энергетическим университетом).

В качестве примеров приведем следующие курсы НИЯУ МИФИ различной направленности со статистикой их использования студентами различных стран мира:

- общеобразовательный курс «Элементы атомной и ядерной физики» (рис. 1);
- спецкурс «Основы физики ядерных реакторов» (рис. 2).

Курс «Основы физики ядерных реакторов» на английском языке за два года собрал более 20 000 слушателей из более чем 20 стран мира. Наибольшее число студентов, прослушавших курс, было из Индии, США, Бангладеша, Российской Федерации, Филиппин, Египта, Мексики, Бразилии, Пакистана. Отметим, что в списке стран присутствуют государства, сотрудничающие с Госкорпорацией «Росатом», что является свидетельством о том, что в этих странах ведется подготовка кадров для взаимовыгодного международного сотрудничества в области ядерной физики и смежных технологий;

- обзорный курс «Физика как глобальный проект» (рис. 3);

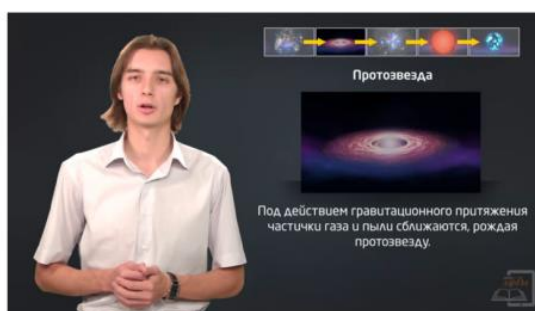
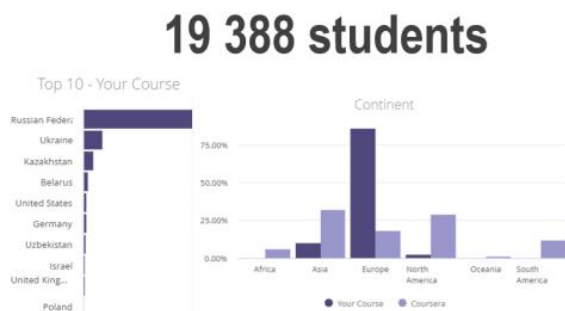
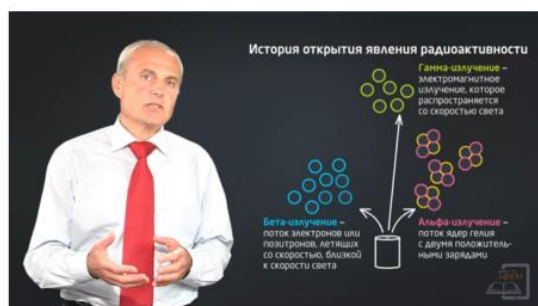


Рис. 1. Статистика курса «Элементы атомной и ядерной физики»

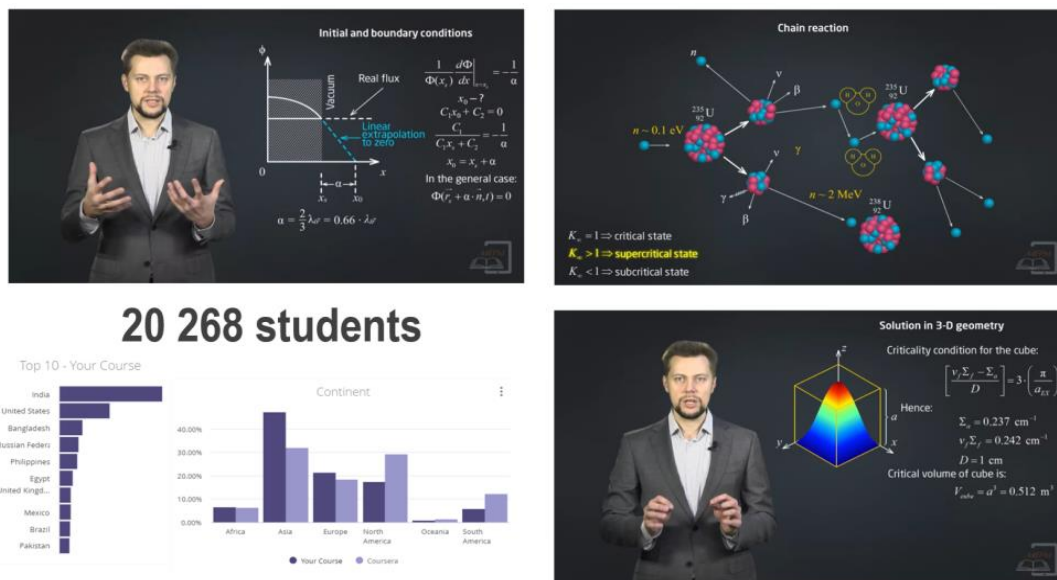


Рис. 2. Статистика курса «Основы физики ядерных реакторов»

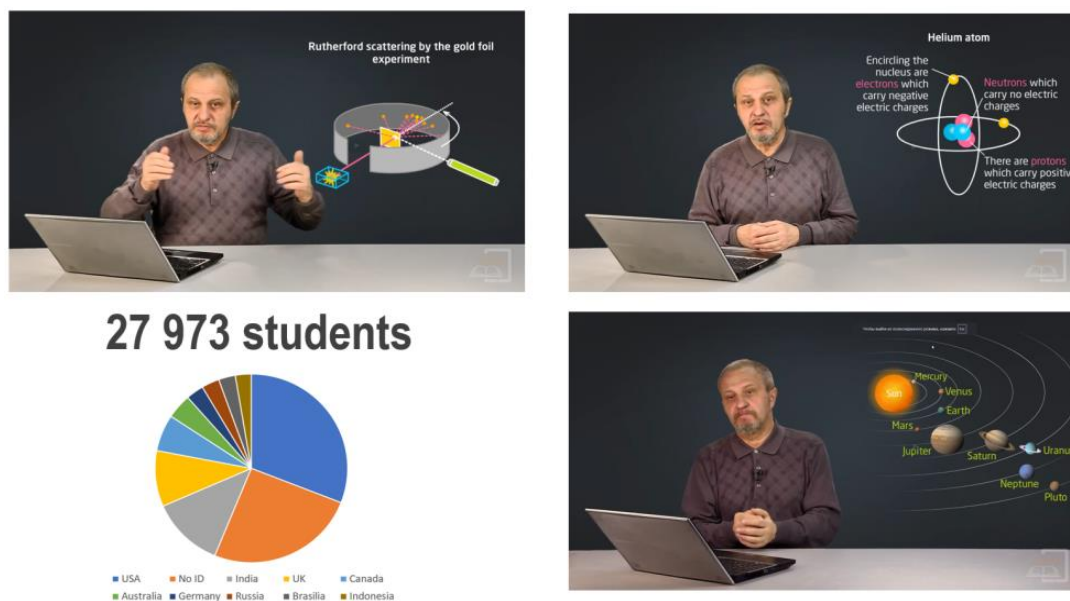


Рис. 3. Статистика курса «Физика как глобальный проект»

• общеобразовательный курс инженерной направленности «Изобретения, изменившие мир» (рис. 4);

• спецкурс для иностранных студентов «Русский язык для иностранных студентов, изучающих ядерную физику и технологии» (рис. 5).

Специалистами, преподающими на кафедрах различных подразделений МИФИ, разработаны следующие курсы:

- «Основы управления проектами в современной бизнес-среде»;
- «Мощные лазеры и лазерный термоядерный синтез»;
- «Лазеры: физические основы и лазерные технологии»;

- «Методы анализа поверхности»;
- «Введение в современные нанотехнологии»;
- «Строение биологических тканей для моделирования в биомедицинской физике»;
- «Физические основы квантовой информатики»;
- «Основы квантовой криптографии»;
- «Математические и инструментальные методы машинного обучения»;
- «Коммерциализация технологий в промышленном комплексе»;
- «Теория и практика эффективной коммуникации».

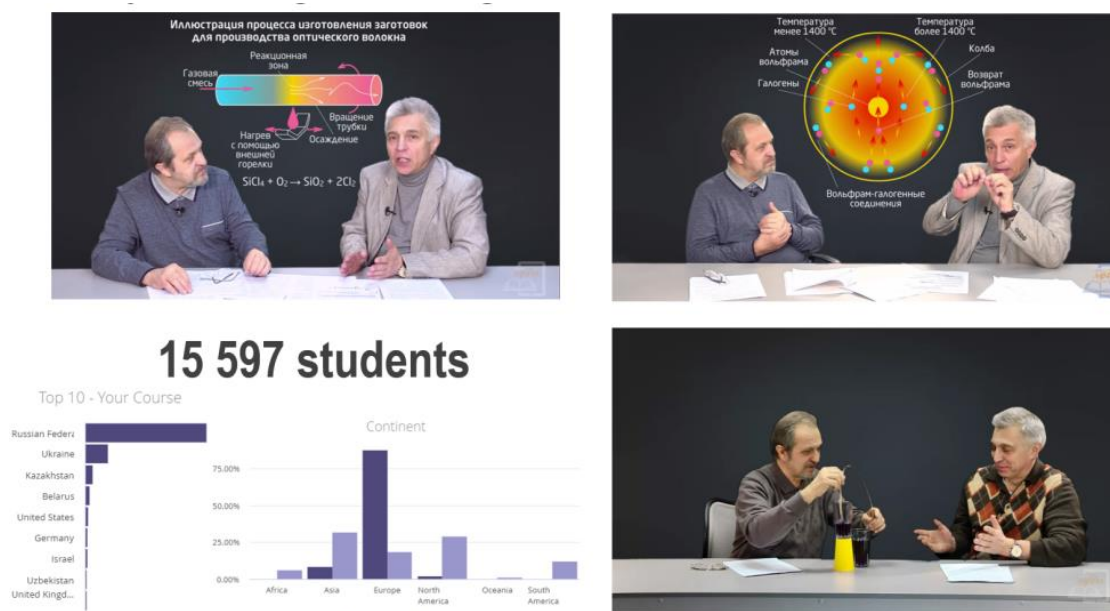


Рис. 4. Статистика курса «Изобретения, изменившие мир»

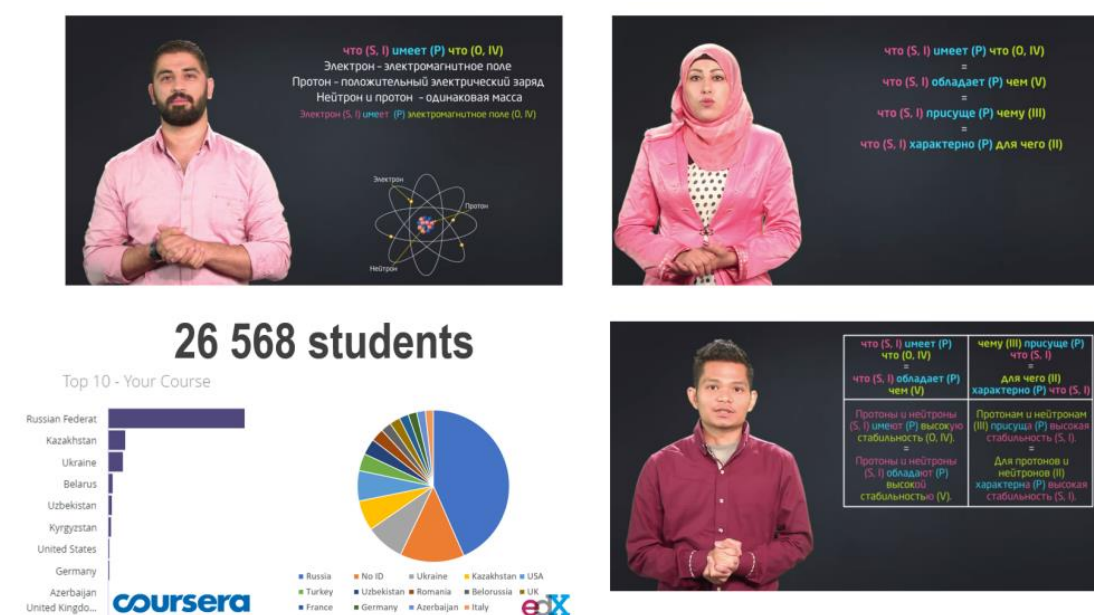


Рис. 5. Статистика курса «Русский язык для иностранных студентов, изучающих ядерную физику и технологии»

В 2020 г. НИЯУ МИФИ совместно с ОИЯИ подготовил курс «Ускорительный комплекс NICA – проект класса мегасайенс». Курс состоит из восьми модулей, разработанных ведущими специалистами Объединенного института ядерных исследований и НИЯУ МИФИ, которые рассказывают о проектах класса мегасайенс, ускорителях частиц и новом ускорительном комплексе NICA (Nuclotron based Ion Collider FAcility).

Этот мегапроект имеет важное значение для реализации прикладных и фундаментальных исследований в области ядерной физики. Пройдя курс, студенты узнают о шагах,

которые предпринимают ученые для создания в лабораторных условиях и затем изучения особого состояния материи – кварк-глюонной плазмы, в котором находилась наша Вселенная в первые мгновения после Большого взрыва. НИЯУ МИФИ принимает активное участие в проекте NICA и разрабатывает различные компоненты этого ускорительного комплекса. Многие разработчики этого проекта являются выпускниками НИЯУ МИФИ. В Учебно-научном центре ОИЯИ действует базовая кафедра НИЯУ МИФИ, предлагающая программу по подготовке специалистов для проекта NICA. Этот курс включен в учебную программу.

После прохождения курса слушатели получают следующие знания:

- основы проектирования крупных научных комплексов;
- основы структуры и задачи комплекса NICA;
- основы использования криогенных технологий в физике высоких энергий;
- основы устройства сверхпроводящих магнитов.

В НИЯУ МИФИ разработаны несколько специализаций. Одна из них – «Правовые основы и базы данных в ядерной отрасли». Цель данной специализации – предоставление студентам структурированных знаний в области правовых основ и баз данных атомной отрасли, технологии поиска информации о физических характеристиках радиоактивных распадов и различных ядерных реакций.

Данная специализация фокусируется на основных направлениях и проблемах, которые необходимо решить при анализе и разработке правового регулирования атомной энергетики [3]. Кроме того, студенты смогут понять передовые концепции ядерного права, узнать, почему управление знаниями имеет важное значение для обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации атомной энергетики [4], ознакомиться с вопросами ядерного нераспространения [5].

Данная специализация необходима студентам, изучающим ядерную физику и смежные технологии, инженерам, программистам, ученым, желающим повысить свою квалификацию. Хотя специалитет посвящен правовым основам атомной отрасли, авторы адресуют его слушателям, не имеющим юридического образования.

Указанная специализация состоит из пяти курсов:

«Введение в международное ядерное право»

Этот курс охватывает наиболее фундаментальные области и вопросы, которые необходимо решать при анализе и разработке правовой базы такой сложной технологии, как ядерная энергетика [6]. Ядерная энергия открывает широкие перспективы для получения значительных выгод в самых разных областях: от медицины и сельского хозяйства до энергетики и промышленности. В то же время общеизвестно, что атомная энергетика представляет серьезную угрозу здоровью и безопасности людей и окружающей среде. Эти

риски необходимо контролировать очень тщательно. Важно признать, что международно-правовые нормы регулирования атомной энергетики также являются частью национальной правовой системы государства.

Курс состоит из 6 модулей:

- Модуль 1. Международное право.
- Модуль 2. Общие принципы международного права.
- Модуль 3. Международное публичное право договоров.
- Модуль 4. Международное ядерное право.
- Модуль 5. Принципы ядерного права.
- Модуль 6. Ответственность за ядерный ущерб.

«Международное ядерное право: передовые концепции»

Первая часть этого курса посвящена требованиям к эксплуатации ядерной установки – первоначальному процессу лицензирования и последующему непрерывному нормативному контролю. Далее рассматриваются международная система радиологической защиты и правовая база ядерной безопасности [7], транспортировки и трансграничного перемещения ядерных материалов [8]. Наконец, обсуждаются вопросы незаконного оборота ядерных материалов и ядерного терроризма.

Курс включает в себя 6 модулей:

- Модуль 1. Ядерные объекты.
- Модуль 2. Регулирующий орган и его функции.
- Модуль 3. Международная система радиационной защиты.
- Модуль 4. Транспортировка ядерных и радиоактивных материалов.
- Модуль 5. Защитные меры, экспортный и импортный контроль.
- Модуль 6. Экспортно-импортный контроль и физическая защита.

«Управление ядерными знаниями»

В этом курсе студенты получают сведения о том, что такое ядерные знания, почему так важно их эффективно использовать и сохранять. Например, старшее поколение специалистов уходит на пенсию, страны расширяют свои ядерные программы, стареющие ядерные установки могут столкнуться с проблемами безопасности, существует растущая потребность в долгосрочном хранении радиоактивных

отходов. В курсе также объясняется, как использовать, передавать и сохранять знания для будущего развития ядерной энергетики [9].

Курс рассчитан не только на студентов атомных специальностей, но и на сотрудников организаций, работающих в сфере мирного использования атомной энергии. Этот курс разработан с учетом рекомендаций Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) и на основе публикаций МАГАТЭ по управлению ядерными знаниями.

Курс состоит из 8 модулей:

- Модуль 1. Концепции знаний с введением в ядерные знания.
- Модуль 2. Управление знаниями (УЗ): история и развитие.
- Модуль 3. Управление знаниями в ядерной науке и технике.
- Модуль 4. Управление неявными знаниями.
- Модуль 5. Управление ядерной информацией.
- Модуль 6. Управление ядерными знаниями. Организационные проблемы.
- Модуль 7. Внедрение управления знаниями в ядерных организациях.
- Модуль 8. Оценка зрелости управления ядерными знаниями.

***«Нераспространение ядерного оружия:
правовые аспекты,
основа национальных гарантий»***

Этот курс знакомит студентов с режимом нераспространения ядерного оружия, включая правовые аспекты деятельности в области ядерной энергетики. Освещены основы национального режима нераспространения ядерного оружия в Российской Федерации. Также рассматриваются вопросы гарантий ядерного нераспространения, в том числе нормативно-технические аспекты деятельности, связанной с обращением с ядерными материалами [10]. Большое внимание уделяется учету, контролю и безопасности ядерных материалов на объектах ядерного топливного цикла [11, 12].

Курс состоит из 7 модулей:

- Модуль 1. Атомная энергетика и технологии двойного назначения.
- Модуль 2. Режим нераспространения ядерного оружия.
- Модуль 3. Договор о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО).

– Модуль 4. Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) и гарантии безопасности.

– Модуль 5. Нормативно-правовая база безопасного обращения с ядерными материалами.

– Модуль 6. Государственная система учета и контроля ядерных материалов.

– Модуль 7. Основные учетные процедуры. Измерения ядерных материалов в целях учета и контроля.

***«Ядерные данные. Система визуализации
ядерных данных JANIS»***

Занимаясь различными физическими расчетами и моделированием в области физических процессов, мы имеем дело с ядерными данными. Если нет данных о свойствах веществ или нуклидов, существующие модели, даже самые лучшие, не смогут адекватно описать реальность.

Это краткий практический курс, посвященный ядерным данным (рис. 6). К настоящему времени накопилось много данных по характеристикам радиоактивных изотопов и их распадов, а также данных по различным ядерным реакциям. Они сосредоточены в различных системах. Одной из таких систем является система визуализации ядерных данных JANIS (программное обеспечение ядерной информации на основе Java). На этом курсе студенты учатся работать с системой визуализации ядерных данных JANIS. Чтобы избежать необходимости установки этого программного обеспечения на персональные компьютеры, можно использовать виртуальные машины, на которых уже установлена программа.

Курс состоит из 4 модулей:

- Модуль 1. Карта нуклидов. Система иллюстрации ядерных данных JANIS.
- Модуль 2. Данные о радиоактивных распадах.
- Модуль 3. Данные о сечениях ядерных реакций.
- Модуль 4. Данные о реакции деления (осколки деления, запаздывающие нейтроны).

Всего было создано свыше семидесяти онлайн-курсов, которые были размещены на международных и национальных платформах. Как уже упоминалось выше, общее число студентов превышает 300 000 человек из более чем 100 стран мира. Это свидетельствует о том, что работа, выполняемая НИЯУ МИФИ, востребована.

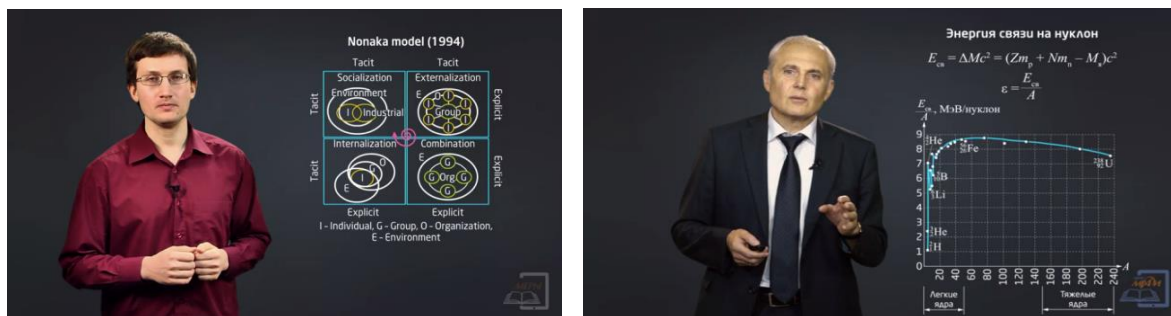


Рис. 6. Курсы «Управление ядерными знаниями» и «Ядерные данные». Система визуализации ядерных данных JANIS»

ОНЛАЙН-КУРСЫ ОТКРЫТОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ И ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ МУЛЬТИДИСЦИПЛИНАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОИЯИ

ОИЯИ всегда уделял большое внимание различным образовательным проектам. В последние несколько лет на базе Учебно-научного центра ОИЯИ развивается проект по созданию Открытой информационной и образовательной среды для поддержки фундаментальных и прикладных мультидисциплинарных исследований ОИЯИ. Сайт проекта – <https://edu.jinr.ru> [13].

Цели проекта:

1. Использование современных образовательных технологий для подготовки студентов университетов и повышения квалификации специалистов для работы в ОИЯИ.

2. Привлечение талантливой молодежи из стран-участниц и стран, сотрудничающих с ОИЯИ, к участию в исследовательских проектах Института.

3. Внедрение результатов в области фундаментальных и прикладных исследований, полученных в ОИЯИ, в образовательный процесс в странах-участницах и ассоциированных членах ОИЯИ. Расширение географии сотрудничества.

4. Сотрудничество с ведущими мировыми научными центрами и университетами в области создания образовательных ресурсов для учителей физики и школьников старших классов.

5. Повышение узнаваемости фундаментальных и прикладных мультидисциплинарных исследований, которые ведутся в ОИЯИ, и бренда ОИЯИ среди широкой аудитории. Размещение курсов, подготовленных ведущими специали-

стами ОИЯИ на международных платформах открытого образования.

6. Создание образовательного и выставочного контента по тематике ОИЯИ на уровне ведущих научных центров.

В рамках проекта решаются задачи в следующих направлениях:

- информационная поддержка основных направлений фундаментальных и прикладных исследований в ОИЯИ;

- создание онлайн-курсов и новых образовательных программ по тематике деятельности Института на современных образовательных платформах;

- развитие проекта по созданию виртуальных, дистанционных и лабораторных практикумов для изучения ядерной физики и ее прикладных направлений;

- развитие выставочной деятельности о достижениях ОИЯИ и современной науки в РФ и странах, сотрудничающих с ОИЯИ;

- создание мультимедийных ресурсов и веб-решений для поддержки информационных центров ОИЯИ;

- создание электронных учебных материалов и исследовательских лабораторных работ для школьников в целях изучения физики и биологии на углубленном уровне в школе.

На рис. 7 приведены примеры названий некоторых онлайн-курсов от ведущих ученых ОИЯИ.

Следует отметить, что при создании курсов необходимые видеосъемки проводились непосредственно на экспериментальных установках – фабрике сверхпроводящих магнитов и в криогенном центре ускорительного комплекса NICA.

Специалисты ОИЯИ, представители университетов стран-партнеров ОИЯИ принимают активное участие в создании образовательного контента для онлайн-курсов [14].

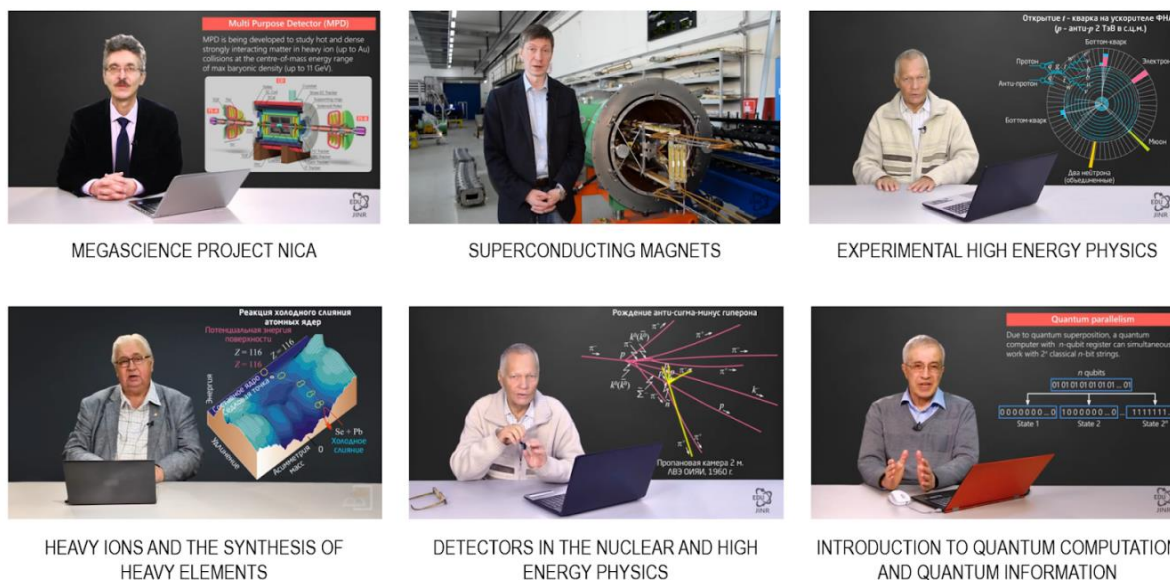


Рис. 7. Примеры онлайн-курсов, опубликованных на Образовательном портале ОИЯИ

Одним из последних результатов является размещение на Образовательном портале ОИЯИ цикла лекций «Синтез сверхтяжелых элементов» выпускника МИФИ – академика Юрия Цолаковича Оганесяна. В них Ю.Ц. Оганесян рассказывает о происхождении ядер и атомов во Вселенной, различных подходах к искусственному синтезу элементов тяжелее урана, существовании так называемого «Острова стабильности», а также о перспективах получения новых ядер на ускорительном комплексе – фабрике сверхтяжелых элементов. Цикл из пяти лекций состоит из следующих разделов:

1. Введение;
2. Экспериментальные подходы к проверке теоретических предсказаний;
3. Организация эксперимента;
4. Результаты экспериментов;
5. Новые возможности.

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПРОЕКТ «ВИРТУАЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ» КАК СОВРЕМЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ

Эксперименты всегда были неотъемлемой частью изучения физики. Они являются одним из наиболее эффективных способов получить знания в такой области исследований, как ядерная физика. При этом, необходимо учитывать, что многие эксперименты связаны с работой с радиоактивным излучением, что пред-

ставляет определенные ограничения и в школьном, и в университетском образовании. Некоторым университетам сложно организовать качественный практикум по ядерной физике в связи с отсутствием соответствующего оборудования из-за его достаточно высокой стоимости, особенно если речь идет о современных детекторах [15].

Проект «Виртуальная лаборатория для изучения ядерной физики» (рис. 8) развивается с 2015 г. Целью проекта является включение реальных экспериментальных данных в образовательный процесс, проведение виртуальных и дистанционных лабораторных исследований с использованием современного научного оборудования и данных, полученных с реальных физических установок.

Первоначально целью этого проекта было создание программно-аппаратного комплекса для подготовки специалистов из ЮАР для эксперимента LIS по изучению спонтанного деления, проводимого в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Виртуальная лаборатория ядерного деления включает в себя учебные материалы и виртуальные практикумы как по основам работы с ядерно-физическим оборудованием (осциллографы, детекторы, система сбора данных), так и по основам работы с реальными экспериментальными данными, полученными с установки LIS [16].

В дополнение к лабораторным работам были разработаны и учебные курсы по экспериментальной ядерной физике для студентов с разным уровнем подготовки (базовый и углубленный уровень).

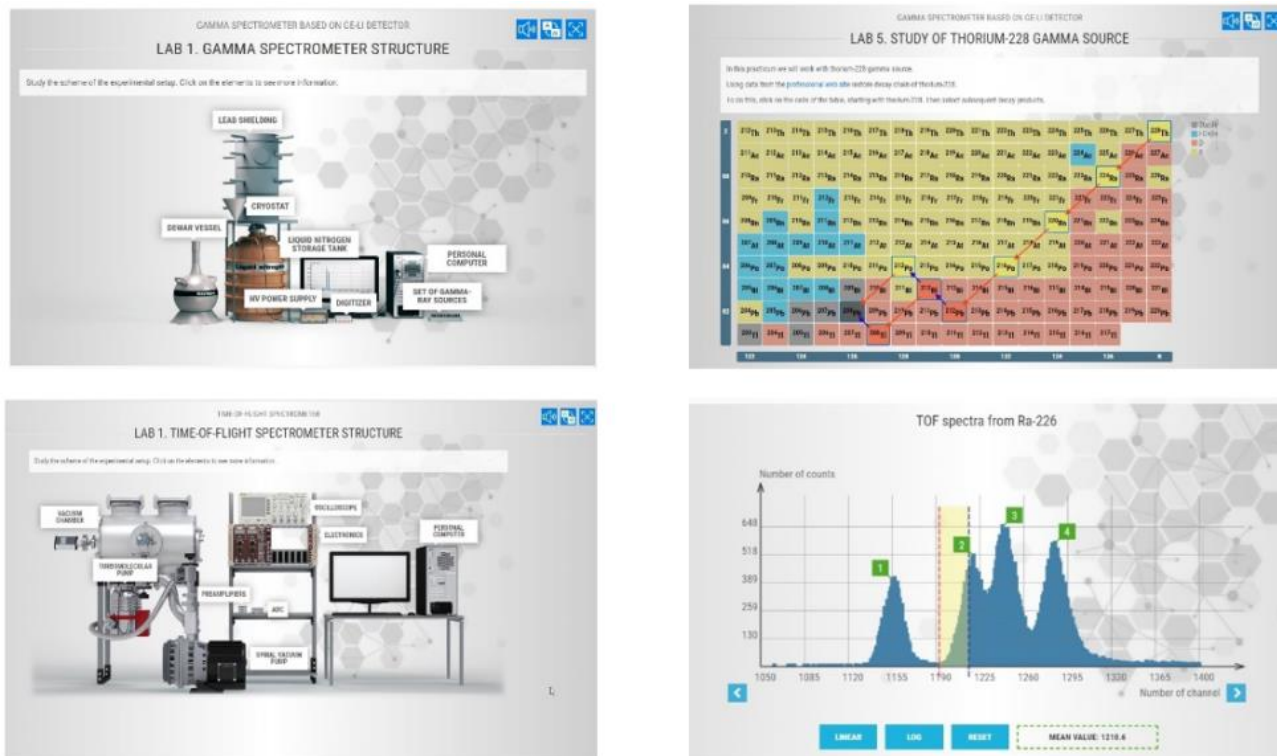


Рис. 8. Фрагменты виртуальных работ проекта «Виртуальная лаборатория для изучения ядерной физики»

На сегодняшний день проект развивается по следующим направлениям:

1. Онлайн-курс и учебное пособие «Введение в экспериментальную ядерную физику и ядерную электронику»;
2. Лаборатория ядерного деления;
3. Лаборатория гамма-спектрометрии;
4. Лаборатория анализа данных в ROOT;
5. Лаборатория детекторов и обработки данных;
6. Hands-on практикум.

Сейчас все эти результаты проекта используются в образовательном процессе университетов более 30 стран (рис. 9).

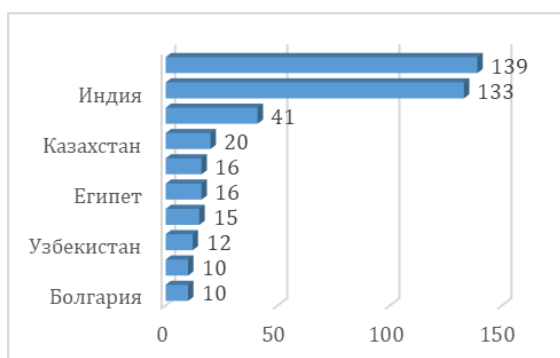


Рис. 9. Зарегистрированные пользователи сайта проекта «Виртуальная лаборатория для изучения ядерной физики»

Материалы проекта использовались при проведении практик и мастер-классов по экспериментальной ядерной физике для школьников и студентов из разных стран (рис. 10), в том числе России, Израиля, Египта, Германии, Чехии, Вьетнама, Сербии, Болгарии и ЮАР [17]. По итогам таких мероприятий мы получили много полезных отзывов и положительных эмоций как от преподавателей, так и от учеников.

Опыт разработки данного проекта доказал, что его результаты востребованы как в университетской среде, так и в качестве дополнительного учебного материала для старшеклассников. Многие из разработанных виртуальных лабораторных работ включены в учебные программы вузов-участников проекта. Думаем, это связано с тем, что нам удалось выйти за рамки стандартного набора тем лабораторных работ, создать свои работы на основе реальных данных и современных детекторов, а также в рамках одного проекта интегрировать приобретение новых навыков как в области проведения эксперимента, так и в области обработки данных.



Рис. 10. Лабораторные практикумы в ОИЯИ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сотрудничество международной научной организации Объединенного института ядерных исследований и Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» позволило создать основы открытой информационно-образовательной среды в одной из наиболее актуальных областей знаний – фундаментальной и прикладной ядерной физике.

Расширяется сотрудничество на международном уровне, появляются новые партнеры. Полученные результаты в дальнейшем могут быть внедрены в образовательную деятельность Международного научно-образовательного центра атомных и смежных технологий, который призван стать «хабом» для иностранных студентов и специалистов в целях профессиональной подготовки и дальнейшего карьерного развития не только для атомной, но и для других высокотехнологичных отраслей, научно-образовательным интегратором компетенций и возможностей НИЯУ МИФИ, опорных вузов Росатома, Технической Академии Росатома и других научно-исследовательских организаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Belaga V.V., Dolgy E.V., Klygina K.V. et al. Online courses at international and national platforms and the possibility of creating a digital educational envi-

ronment for megaprojects // Journal of Physics Conference Series, 2019. V. 1406(1). 012004. DOI: 10.1088/1742-6596/1406/1/012004

2. Belaga V.V. et al. JINR Educational Portal («edu.jinr.ru») – Open Educational Resources and Modern Visualization Tools // Proceedings of the 27th Symposium on Nuclear Electronics and Computing. Budva, Becici, Montenegro. P. 261–265.

3. Бушуйев А.В., Гераскин Н.И. и др. Основы учета, контроля и физической защиты ядерных материалов. М.: МИФИ, 2007.

4. Geraskin N.I et al. Knowledge management in nuclear organizations, Moscow: NRNU MEPhI, 2015.

5. Орлов В.А. Ядерное нераспространение: Учебное пособие для вузов. М.: ПИР-Центр, 2002. 528 с.

6. IAEA. Convention on Nuclear Safety. Legal Series no. 16, Vienna: International atomic energy agency, 1994. 110 p.

7. IAEA. Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. Vienna: International atomic energy agency, 1997.

8. IAEA. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material-2012 Edition. IAEA Safety Standards Series No. SSR-6, Vienna: IAEA, 2012. 168 p.

9. IAEA. Knowledge Management for Nuclear Research and Development Organizations. Vienna: IAEA-TECDOC-1675, 2012. 74 p.

10. Крючков Э.Ф. и др. Технические аспекты ядерного нераспространения. М.: НИЯУ МИФИ, 2010.

11. Глебов В.Б., Измайлов А.В., Румянцев А.Н. Основы учета, контроля и физической защиты ядерных материалов. М.: МИФИ, 2001.

12. Бондарев П.В., Измайлов А.В., Толстой А.И. Физическая защита ядерных объектов: Учебное пособие для вузов // Под ред. Н.С. Погожина. М.: НИЯУ МИФИ, 2008. 584 с.

13. Belaga V.V. et al. Multimedia educational resources for the JINR activities and achievements popularization // International Scientific – Practical Conference «INFORMATION INNOVATIVE TECHNOLOGIES». Prague, Czech Republic, 2017. P. 100–105.

14. Belaga V.V. et al. New Results from Colliders and Accelerators for School Teachers and School Students // The 15th annual international conference on Hands-on Science, HSCI2018, Barcelona, Catalonia, Spain, 2018. P. 99–101.

15. Belaga V.V. et al. Virtual laboratory of nuclear fission, a new pedagogical tool for student training in

experimental nuclear physics// International Conference on Hands-on Science: Growing with Science, HSCI2017. Braga, Portugal, 2017. P. 157.

16. Agakishiev G. et al. Hardware-Software Complex «Virtual Laboratory of Nuclear Fission» – Integration of Virtuality, Modern Equipment and Real Experimental Data // International Conference on Hands-on Science: Brightening our future, HSCI2015. Madeira Island, Portugal, 2015.

17. Averichev G. et al. Virtual Laboratory – Virtual Educational Tools and Hands-On Practicum // Proceedings of the 27th Symposium on Nuclear Electronics and Computing, Budva, Becici, Montenegro, 2019. P. 464–468.

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI», 2023, vol. 12, no. 6, pp. 339–351

E-LEARNING TOOLS FOR NUCLEAR PHYSICS AND ENGINEERING

N.E. Sidorov^{1,*}, E.B. Vesna^{2,**}, K.V. Klygina^{1,***}, Yu.A. Panebrattsev^{1,****}, G.V. Tikhomirov^{2,*****}

¹Joint Institute of Nuclear Research, Dubna, 141980, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, 115409, Russia

*e-mail: nikita@jinr.ru

**e-mail: ebvesna@mephi.ru

***e-mail: klygina@jinr.ru

****e-mail: yuri@intergraphics.ru

*****e-mail: gvtikhomirov@mephi.ru

Received November 10, 2023; revised November 22, 2023; accepted November 28, 2023

Nowadays, the learning process occurs in different forms, with traditional methods of learning being supplemented and replaced with new online and blended learning formats. The capabilities of modern information technologies make it possible to widely use online courses and specializations produced at numerous universities and leading companies that develop new technologies. E-Learning has become an international trend. Various Massive Open Online Course (MOOC) platforms have become very important, including the National Open Education Platform developed in the Russian Federation. Many modern nuclear physics and engineering courses are developed in collaboration with leading scientific centers and the State Atomic Energy Corporation Rosatom (ROSATOM). This article provides information about the successful cooperation of the large international, intergovernmental scientific center, the Joint Institute for Nuclear Research (JINR), and the National Research Nuclear University «MEPhI» (NRNU MEPhI) with the participation of universities of Bulgaria, Mongolia, Vietnam, Egypt, Serbia and the Republic of South Africa. Such cooperation is aimed to provide an open information and educational environment of fundamental and applied research support, online courses for national and international platforms, and virtual laboratory workshops in nuclear physics and nuclear electronics. In addition to information about e-learning, this article talks about research practices and master class organization for high school students and schoolchildren from different countries, including Egypt, Mexico, India, Vietnam, and the Republic of South Africa. Despite the fact that educational courses about nuclear physics and related technologies are used by a relatively small circle of students and young professionals, our analysis shows that they have a wide audience around the world, including countries that collaborate with JINR, NRNU MEPhI, and ROSATOM. Virtual laboratory workshops dedicated to the basics of experimental nuclear physics are already used at universities in many countries worldwide.

Keywords: online course; nuclear physics; virtual laboratory; hands-on practicum; materials science; life sciences.

REFERENCES

1. *Belaga V.V., Dolgy E.V., Klygina K.V. et al.* Online courses at international and national platforms and the possibility of creating a digital educational environment for megaprojects. *Journal of Physics Conference Series*, 2019. Vol. 1406(1), 012004. DOI: 10.1088/1742-6596/1406/1/012004
2. *Belaga V.V. et al.* JINR Educational Portal («edu.jinr.ru») – Open Educational Resources and Modern Visualization Tools. *Proceedings of the 27th Symposium on Nuclear Electronics and Computing*. Budva, Becici, Montenegro. Pp. 261–265.
3. *Bushuev A.V., Geraskin N.I. et al.* *Osnovy ucheta, kontrolya i fizicheskoy zashchity yadernyh materialov*. [Fundamentals of accounting, control and physical protection of nuclear materials]. Moscow, NRNU MEPhI Publ., 2007 (in Russian).
4. *Geraskin N.I. et al.* *Knowledge management in nuclear organizations*. Moscow, NRNU MEPhI, 2015.
5. *Orlov V.A. et al.* *Yadernoe nerasprostranenie: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Nuclear nonproliferation. Textbook for universities]. Moscow, PIR Center Publ., 2002. 528 p. (in Russian).
6. IAEA. *Convention on Nuclear Safety*. Legal Series no. 16, Vienna, International atomic energy agency, 1994. 110 p.
7. IAEA. *Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management*. Vienna, International atomic energy agency, 1997.
8. IAEA. *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material-2012 Edition*. IAEA Safety Standards Series No. SSR-6, Vienna, IAEA, 2012. 168 p.
9. IAEA. *Knowledge Management for Nuclear Research and Development Organizations*. Vienna, IAEA-TECDOC-1675, 2012. 74 p.
10. *Kryuchkov E.F. et al.* *Tekhnicheskie aspekty yadernogo nerasprostraneniya* [Technical aspects of nuclear non-proliferation]. Moscow, NRNU MEPhI Publ., 2010 (in Russian).
11. *Glebov V.B. et al.* *Osnovy ucheta, kontrolya i fizicheskoy zashchity yadernyh materialov* [Introduction to accounting, control and physical protection systems for nuclear materials]. Moscow, NRNU MEPhI Publ., 2001 (in Russian).
12. *Bondarev P.V., Izmajlov A.V., Tolstoj A.I. et al.* *Fizicheskaya zashchita yadernyh ob'ektov: ucheb. posobie dlya vuzov*. Pod red. N.S.Pogozhina. [Physical protection of nuclear facilities. Textbook for universities. Edited by N.S.Pogozhin]. Moscow, NRNU MEPhI Publ., 2008. 584 p. (in Russian).
13. *Belaga V.V. et al.* *Multimedia educational resources for the JINR activities and achievements popularization*. *International Scientific – Practical Conference «Information innovative technologies»*. Prague, Czech Republic, 2017. Pp. 100–105.
14. *Belaga V.V. et al.* *New Results from Colliders and Accelerators for School Teachers and School Students*. The 15th annual international conference on Hands-on Science, HSCI2018, Barcelona, Catalonia, Spain, 2018. Pp. 99–101.
15. *Belaga V.V. et al.* *Virtual laboratory of nuclear fission, a new pedagogical tool for student training in experimental nuclear physics*. *International Conference on Hands-on Science: Growing with Science, HSCI2017*. Braga, Portugal, 2017. P. 157.
16. *Agakishiev G. et al.* *Hardware-Software Complex «Virtual Laboratory of Nuclear Fission» – Integration of Virtuality, Modern Equipment and Real Experimental Data*. *International Conference on Hands-on Science: Brightening our future, HSCI2015*. Madeira Island, Portugal, 2015.
17. *Averichev G. et al.* *Virtual Laboratory – Virtual Educational Tools and Hands-On Practicum*. *Proceedings of the 27th Symposium on Nuclear Electronics and Computing*, Budva, Becici, Montenegro, 2019. Pp. 464–468.

УДК: 539.12.04

РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЗ ЭЛЕКТРОНОВ В МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПЛАСТИКАХ

А.А. Сорокина^{1*}, А.А. Булавская¹, Е.А. Бушмина¹, А.А. Григорьева¹,
И.А. Милойчикова^{1,2}, С.Г. Стучебров¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, 634050, Россия

²Научно-исследовательский институт онкологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр
Российской академии наук, Томск, 634009, Россия

*e-mail: aas282@tpu.ru

Поступила в редакцию 17.10.2023 г.

После доработки: 18.10.2023

Принята к публикации: 07.11.2023

Лучевая терапия пучками ионизирующего излучения является одним из методов лечения злокачественных новообразований. Ионизирующее излучение при взаимодействии с опухолевыми клетками приводит к их разрушению. Однако в процессе облучения злокачественных новообразований неизбежно оказывается негативный эффект и на здоровые клетки. В связи с этим важной задачей лучевой терапии является обеспечение оптимального распределения дозы таким образом, чтобы минимизировать воздействие излучения на здоровые ткани и доставить максимальную дозу в опухоль. Одним из устройств, позволяющих формировать глубинное распределение дозы в теле пациента, является болюс. Ранее авторами было предложено изготавливать болюсы для электронной лучевой терапии с помощью методов трехмерной печати. Целью данной работы стала разработка численной модели для определения глубинного распределения доз электронов в пластиках, модифицированных металлической примесью. Благодаря использованию этих материалов можно создавать болюсы меньшего объема, что позволит ускорить время его изготовления и упростить процедуру фиксации устройства на теле пациента. В данном исследовании были разработаны расчетные модели пучка электронов и пластиковых болюсов с помощью инструментария GEANT4. Численные эксперименты проводились методом Монте-Карло. В результате моделирования были получены глубинные распределения дозы пучка электронов с номинальной энергией 6, 12 и 15 МэВ в модифицированных пластиках с примесью меди. В перспективе, полученные данные позволят выбирать толщину формирующего устройства, изготовленного с помощью трехмерной печати из исследованных пластиков, в соответствии с клинической задачей.

Ключевые слова: электронная лучевая терапия; болюс; технологии трехмерной печати; глубинное распределение дозы; метод Монте-Карло.

DOI: 10.26583/vestnik.2023.280

ВВЕДЕНИЕ

Для успешного лечения поверхностных новообразований, включая рак кожи, молочной железы и носоглотки, используются пучки электронов. Чтобы процесс электронной лучевой терапии был эффективным, необходимо точно распределить дозу излучения в организме пациента с целью минимизации вредных эффектов на здоровые ткани и одновременной доставки максимальной дозы раковым клеткам. Для создания оптимального распределения дозы используются различные методы и устройства, включая болюсы [1].

Болюсы – это специальные устройства, которые изготавливаются из различных материалов.

Они размещаются на поверхности тела пациента в области, которая подлежит облучению. Болюсы позволяют модифицировать глубинное распределение дозы излучения в соответствии с клинической задачей [2].

Для изготовления болюсов традиционно используют воск, желатин и различные гели. Однако использование таких материалов имеет свои ограничения. В процессе использования форма и размеры таких изделий могут изменяться, что ограничивает их применение. Кроме того, данный подход не обеспечивает повторяемость результатов облучения, поскольку каждый болюс изготавливается вручную [3].

На сегодняшний день имеется несколько коммерчески доступных болюсов [4–6], напри-

РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЗ ЭЛЕКТРОНОВ В МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПЛАСТИКАХ

мер Superflab [7]. Такой боллус изготовлен из специального геля и представляет собой пластину определенной толщины. Такое устройство с высокой точностью повторяет изгибы тела пациента. Основным минусом данного боллуса является его высокая стоимость и невозможность точного подбора толщины и формы устройства для решения конкретной задачи.

В работе [8] было предложено использовать технологию трехмерной печати для создания боллусов для электронной лучевой терапии. Преимущества данного подхода заключаются в возможности быстрого изготовления боллусов сложной формы с высокой точностью, упрощении процесса производства и относительно низкой стоимости используемых материалов [9].

В данной работе для изготовления боллусов было предложено использовать пластик, модифицированный металлической примесью, который позволит создавать боллусы меньшего объема, чем при использовании стандартных материалов, что, в свою очередь, позволит ускорить время изготовления формирующего устройства и упростить процедуру его фиксации на теле пациента.

Целью данной работы является разработка численной модели для определения глубинного распределения доз электронов в модифицированных пластиках.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Среда моделирования

Численное моделирование проводилось с использованием инструментария GEANT4 [10], в основе которого лежит метод Монте-Карло

[11]. В данном инструментарии создается модель системы, состоящей из частиц излучения и вещества. Излучение моделируется в виде потока частиц, которые взаимодействуют с атомами или молекулами вещества. Траектории и свойства каждой частицы излучения моделируются с помощью стохастических процессов [12]. При моделировании взаимодействия происходит случайный выбор типа процесса взаимодействия и его вероятности. Метод Монте-Карло позволяет получить статистические данные о взаимодействии излучения с веществом.

Разработка исследуемых материалов

В данной работе исследовались модифицированные материалы, которые представляли собой ПЛА-пластик (полилактид) с примесью меди в разной концентрации. При разработке численной модели таких материалов необходимо определить их массовые плотности и содержание примеси меди экспериментальным методом. Для этого были изготовлены тестовые образцы с размерами $2 \times 2 \times 2$ см³ с помощью 3D-принтера Original Prusa i3 Mk3s [13] из филаментов производства Bestfilament [14].

При изготовлении всех тестовых образцов были использованы следующие параметры печати: диаметр нити филамента – 1.75 мм, толщина слоя – 0.3 мм, диаметр сопла – 0.4 мм, скорость печати – 40 мм/мин, температура сопла – 235 °С и температура стола – 90 °С, 100 % заполнение пластиком по объему изделия.

В табл. 1 представлены полученные параметры материалов.

Таблица 1. Параметры для создания модели материалов

Пластик	Содержание примеси меди (k), %	Плотность, г/см ³	Элементный состав, %			
			H	C	O	Cu
Материал 1	3	1.39	5.4	48.5	43.1	3.0
Материал 2	7	1.46	5.2	46.5	41.3	7.0
Материал 3	17	1.60	4.6	41.5	36.9	17.0

Расчетная геометрия

Разработка модели выведенного электронного пучка медицинского ускорителя подробно описана в работе [15]. Модель данного источника включает в себя основную часть системы формирования медицинского линейного ускорителя и состоит из генератора электронов,

коллиматора, проходной ионизационной камеры, коллимирующей диафрагмы и аппликатора. Смоделированный выведенный электронный пучок имеет квадратную форму с поперечными размерами 10×10 см². Энергии электронного пучка составляли 6, 12 и 15 МэВ.

Геометрия моделирования соответствовала стандартным условиям облучения для электрон-

ной лучевой терапии. Фантом из исследуемых материалов размещался на расстоянии 115 см от источника. Размеры фантома – $30 \times 30 \times 15$ см³. Расчетный объем (фантом) был разбит на воксели размером $4.75 \times 4.75 \times 0.5$ мм³, представляющие собой детектирующие элементы. Количество отслеживаемых первичных частиц составило 10^8 .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Были получены глубинные распределения доз электронов с энергиями 6, 12 и 15 МэВ в каждом исследуемом материале (Материал 1–3). Для иллюстрации полученных результатов на рис. 1 представлено расчетное глубинное распределение доз электронных пучков в Материале 1.

Основными характеристиками глубинного распределения дозы являются положение глубин залегания поглощенной дозы в материале: глубина, при которой доза находится в максимальном положении (R_{100}); глубина, при которой доза составляет 50 % от максимального

значения (R_{50}); глубина, где доза полностью поглотилась материалом ($R_{полн}$). Для анализа полученные результаты для расчетных глубинных распределений доз электронов в исследуемых образцах были представлены в табл. 2.

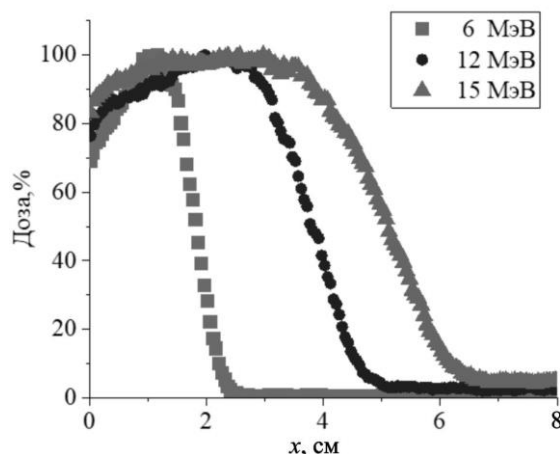


Рис. 1. Процентные глубинные распределения дозы электронных пучков в Материале 1

Таблица 2. Положение глубин залегания поглощенной дозы электронов во всех исследуемых образцах

Энергия электронного пучка	Глубина залегания поглощенной дозы в материале, см	Материал 1	Материал 2	Материал 3
6 МэВ	R_{100}	1.6	1.0	1.0
	R_{50}	1.9	1.8	1.7
	$R_{полн}$	2.5	2.3	2.0
12 МэВ	R_{100}	2.3	2.1	2.1
	R_{50}	3.9	3.7	3.0
	$R_{полн}$	5.0	4.5	4.0
15 МэВ	R_{100}	2.5	2.3	2.2
	R_{50}	4.6	4.5	4.1
	$R_{полн}$	7.0	6.5	5.0

Из-за особенностей трехмерной печати, при увеличении концентрации меди в пластиковой базе процесс подготовки и изготовления изделий усложняется. Поэтому для каждой конкретной задачи необходимо выбирать материал изготовления формирующих устройств оптимальным образом. Например, в случае необходимости полного поглощения пучка по полученным данным (см. табл. 2) видно, что целесообразным является изготовление изделия из материала с максимальной концентрацией (Материал 3). В случае же необходимости изготовления болюса, смещающего максимум глубинного распределения дозы, целесообразно использовать меньшие концентрации (Материал 2). Таким обра-

зом, полученные данные лягут в основу разработки и создания болюсов для решения конкретных клинических задач.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В текущей работе с помощью инструментария GEANT4 были созданы численные модели выведенного электронного пучка медицинского ускорителя и модифицированных пластиков, в которых учитывались плотность и элементный состав реальных филаментов. Были проведены численные эксперименты, в результате которых получены глубинные распределения доз электронов в модифицированных пластиках. Ре-

РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ГЛУБИННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЗ ЭЛЕКТРОНОВ В МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПЛАСТИКАХ

результаты работы лягут в основу разработки и создания болусов для решения клинических задач электронной лучевой терапии.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10014-П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климанов В.А. Радиобиологическое и дозиметрическое планирование лучевой и радионуклидной терапии. Ч. 1. Радиобиологические основы лучевой терапии. Радиобиологическое и дозиметрическое планирование дистанционной лучевой терапии пучками тормозного и гамма-излучения и электронами: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. 500 с.
2. Halperin Edward C., Wazer D., Perez C.A., Brady L.W. Perez & Brady's. Principles and Practice of Radiation Oncology. Seventh Edition. Philadelphia: Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins, 2018. 2069 p.
3. Khan F. M., Gibbons J. P. Khan's the physics of radiation therapy. Fifth edition. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2014. 572 p.
4. Kudchadker R. J. et al. Utilization of custom electron bolus in head and neck radiotherapy // Journal of applied clinical medical physics, 2003. V. 4. № 4. P. 321–333.
5. Mahdavi H., Jabbari K., Roayaei M. Evaluation of various boluses in dose distribution for electron therapy of the chest wall with an inward defect // Journal of Medical Physics/Association of Medical Physicists of India, 2016. V. 41. № 1. P. 38.
6. Sekartaji G., Aisyah S., Carina C.C.C., Nazara T., Nainggolan A., Endarko E. Comparison of Do-

simetry Characteristics from Some Bolus Materials for 6 and 10 MV Photons Beam Radiation Therapy // Journal of Physics: Conference Series, 2020. V. 1505(1). 012028.

7. Болус Superflab [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rpdinc.com/superflab-bolus-05cm-thick-x-30cm-square-1696.html> (дата обращения: 27.06.2022).

8. Lu Y., Song J., Yao X., An M., Shi Q., Huang X. 3D Printing Polymer-based Bolus Used for Radiotherapy // International Journal of Bioprinting, 2021. V. 7. № 4. P. 27–42.

9. Albantow C., Hargrave C., Brown A., Halsall C. Comparison of 3D printed nose bolus to traditional wax bolus for cost-effectiveness, volumetric accuracy and dosimetric effect // Journal of Medical Radiation Sciences, 2020. V. 1. № 67. P. 54–63.

10. GEANT4 [Электронный ресурс]. URL: <https://geant4.web.cern.ch/node/1> (дата обращения 01.10.2023).

11. Wesley E. Bolch. The Monte Carlo Method in Nuclear Medicine: Current Uses and Future Potential // Journal of Nuclear Medicine Mar, 2010. V. 51. № 3. P. 337–339.

12. Fabjan A., Christian W., Schopper H. Particle Physics Reference Library. Vol. 2: Detectors for Particles and Radiation, Springer, 2020. 1087 p.

13. ORIGINAL PRUSA I3 MK3 [Электронный ресурс]. URL: <https://3dtoday.ru/3d-printers/prusa-research/original-prusa-i3-mk3> (дата обращения 27.06.2022).

14. Bestfilament [Электронный ресурс]. URL: <https://bestfilament.ru> (дата обращения 27.06.2022).

15. Miloichikova I.A., Stuchebrov S.G., Krasnykh A.A. Numerical simulation of the medical linear accelerator electron beams absorption by ABS-plastic doped with metal // AIP Conference Proceedings, 2016. V. 732. P. 1–6.

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI», 2023, vol. 12, no. 6, pp. 352–356

DEVELOPMENT OF A NUMERICAL MODEL FOR DETERMINING THE ELECTRON BEAM DEPTH DOSE DISTRIBUTION IN MODIFIED PLASTICS

A.A. Sorokina¹, A.A. Bulavskaya¹, E.A. Bushmina¹, A.A. Grigorieva¹, I.A. Miloichikova^{1,2}, S.G. Stuchebrov¹

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russia

²Cancer Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences,
Tomsk, 634009, Russia

*e-mail: aas282@tpu.ru

Received October 17, 2023; revised October 18, 2023; accepted November 07, 2023

The radiation therapy is one of the methods used for treating malignant tumors. Ionizing radiation during the interaction with tumor cells cause their destruction. However, during the radiation treatment of malignant tumors, there is inevitably a side effect on healthy cells as well. Therefore, an important task of beam therapy is to ensure optimal dose distribution, in order to minimize the impact of radiation on healthy tissues and deliver the maximum

dose to the tumor. One device that allows for the formation of depth dose distribution in the patient's body is a bolus. Previously, boluses for electron beam therapy have been manufactured using three-dimensional printing methods. The aim of this study was to develop a numerical model to determine the electron beam depth dose distribution in plastics modified with metallic additives. The use of these materials enables the creation of smaller boluses, which can accelerate the manufacturing time and simplify the device fixation procedure on the patient's body. Numerical models of electron beam source and plastic boluses were developed using the GEANT4 toolkit. Numerical experiments were conducted using the Monte Carlo method. As a result of the simulation the depth dose distributions of electron beams with nominal energies of 6, 12, and 15 MeV were obtained in modified plastics with copper additives. In the future, the obtained data will allow for the selection of the thickness of the forming device created using three-dimensional printing from the studied plastics, according to the clinical task.

Keywords: electron beam therapy; bolus; three-dimensional printing technologies; depth dose distribution; Monte Carlo method.

REFERENCES

1. *Klimanov V.A.* Radiobiologicheskoe i dozimetricheskoe planirovanie luchevoj i radionuklidnoj terapii. CHast' 1. Radiobiologicheskie osnovy luchevoj terapii. Radiobiologicheskoe i dozimetricheskoe planirovanie distancionnoj luchevoj terapii puchkami tormoznogo i gamma-izlucheniya i elektronami [Radiobiological and dosimetric planning of radiation and radionuclide therapy. Part 1. Radiobiological foundations of radiation therapy. Radiobiological and dosimetric planning of remote radiation therapy with brake and gamma radiation beams and electrons]. Moscow, MEPhI, 2011. 500 p. (in Russian).
2. *Halperin Edward C., Wazer D, Perez C.A., Brady L.W.* Perez & Brady's. Principles and Practice of Radiation Oncology. Seventh Edition. Philadelphia: Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins, 2018. 2069 p.
3. *Khan F.M., Gibbons J.P.* Khan's the physics of radiation therapy. Fifth edition. Philadelphia, Lippincott Williams & Wilkins, 2014. 572 p.
4. *Kudchadker R.J. et al.* Utilization of custom electron bolus in head and neck radiotherapy. Journal of applied clinical medical physics. Vol. 4. No. 4. Pp. 321–333.
5. *Mahdavi H., Jabbari K., Roayaei M.* Evaluation of various boluses in dose distribution for electron therapy of the chest wall with an inward defect. Journal of Medical Physics/Association of Medical Physicists of India. Vol. 41. No. 1. Pp. 38.
6. *Sekartaji G., Aisyah S., Carina C.C.C., Nazara T., Nainggolan A., Endarko E.* Comparison of Dosimetry Characteristics from Some Bolus Materials for 6 and 10 MV Photons Beam Radiation Therapy. Journal of Physics: Conference Series, 2020. Vol. 1505. P. 012028.
7. Superflat Bolus. Available at: <https://www.rpdinc.com/superflab-bolus-05cm-thick-x-30cm-square-1696.html> (accessed 27.06.2022).
8. *Lu Y., Song J., Yao X., An M., Shi Q., Huang X.* 3D Printing Polymer-based Bolus Used for Radiotherapy. International Journal of Bioprinting. Vol. 7. No. 4. Pp. 27–42.
9. *Albantow C., Hargrave C., Brown A., Halsall C.* Comparison of 3D printed nose bolus to traditional wax bolus for cost-effectiveness, volumetric accuracy and dosimetric effect. Journal of Medical Radiation Sciences. Vol. 1. No. 67. Pp. 54–63.
10. GEANT4. Available at: <https://geant4.web.cern.ch/> (accessed 01.10.2023).
11. *Wesley E. Bolch.* The Monte Carlo Method in Nuclear Medicine: Current Uses and Future Potential. Journal of Nuclear Medicine, 2010. Vol. 51. No. 3. Pp. 337–339.
12. *Fabjan A., Christian W., Schopper H.* Particle Physics Reference Library Vol. 2: Detectors for Particles and Radiation. Springer, 2020. 1087 p.
13. ORIGINAL PRUSA I3 MK3. Available at: <https://3dtoday.ru/3d-printers/prusa-research/original-prusa-i3-mk3> (accessed 27.06.2022).
14. Bestfilament. Available at: <https://bestfilament.ru> (accessed 27.06.2022).
15. *Miloichikova I.A., Stuchebrov S.G., Krasnykh A.A.* Numerical simulation of the medical linear accelerator electron beams absorption by ABS-plastic doped with metal. AIP Conference Proceedings, 2016. Vol. 732. No. 012033. Pp. 1–6.

УДК 616-073.757.1

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЦИФРОВЫХ РЕНТГЕНОДИАГНОСТИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДО НАЧАЛА ПРИЕМА ПАЦИЕНТОВ

М.Р. Ахмедзянова¹, М.И. Зеликман², С.А. Кручинин¹, З.А. Лантух^{1,*}, И.В. Солдатов¹,
Ю.А. Васильев¹, Ю.В. Дружинина^{1,**}, А.О. Толоконский³

¹ ГБУЗ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий ДЗМ,
Москва, 127051, Россия

² ООО «Конструкторское бюро РентгенТест», Москва, 105318, Россия

³ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, 115409, Россия

*e-mail: LantukhZA@zdrav.mos.ru

**e-mail: DruzhininaYV2@zdrav.mos.ru

Поступила в редакцию 18.10.2023

После доработки: 19.10.2023

Принята к публикации: 07.11.2023

Для качественной работы рентгенодиагностического оборудования и простого выявления факта неисправности наряду с техническим обслуживанием следует проводить рутинные проверки, ориентированные на рентгенолаборанта. Целью статьи являлась разработка упрощенной методики периодического технического контроля рентгеновского аппарата и проверки стабильности функционирования оборудования без использования специализированного тест-объекта. В работе представлены результаты теоретического и экспериментального исследования метода оперативной проверки работоспособности рентгенодиагностических аппаратов с цифровым приемником в условиях непрерывной работы отделения. Предлагаемый метод ориентирован на оценку работоспособности цифрового рентгенодиагностического аппарата на основании определения параметров зарегистрированного изображения «чистого» поля (изображения, полученного в отсутствие тест-объекта во входной плоскости приемника) и последующей оценки выходного отношения сигнал/шум и коэффициента передачи приемника. Был разработан алгоритм оперативного контроля работоспособности цифрового рентгенодиагностического аппарата. Экспертным способом были установлены допустимые диапазоны изменения параметров ключевых параметров изображения. В исследовании показана работоспособность метода и его простота.

Ключевые слова: оперативный контроль; обеспечение качества; цифровой рентгенодиагностический аппарат; цифровой приемник.

DOI: 10.26583/vestnik.2023.283

ВВЕДЕНИЕ

Корректное функционирование рентгеновского оборудования является обязательным условием обеспечения качества визуализации и безопасности как пациента, так и персонала. В реальной практике медицинских организаций России технический контроль аппарата выполняется при паспортизации рентгеновских кабинетов (не реже одного раза в два года) [1], при техническом обслуживании или после ремонта. Однако, опыт выполнения технической паспортизации рентгеновских кабинетов, которая по своей сути является внешним аудитом, показы-

вает, что эксплуатируемое оборудование может работать со скрытыми неисправностями. Так, только за 2022 г. при паспортизации рентгеновских кабинетов медицинских организаций г. Москвы было зарегистрировано более 50 аппаратов, не соответствующих критериям проверки. По данным агентства ЛСА, причины поломки медицинского оборудования в мировой практике разделены следующим образом: производственный брак, случайные поломки – 20 %, неправильное техническое обслуживание – 60 %, неправильная эксплуатация – 20 %. Дополнительный технический контроль, проводимый персоналом рентгеновского кабинета,

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЦИФРОВЫХ РЕНТГЕНОДИАГНОСТИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДО НАЧАЛА ПРИЕМА ПАЦИЕНТОВ

снижает случайные поломки, своевременно обращает внимание на необходимость проведения диагностики оборудования и предотвращает появление некачественных снимков за счет неправильной эксплуатации.

Производители высокотехнологичного диагностического оборудования (компьютерные, магнитно-резонансные и позитрон-эмиссионные томографы) зачастую реализуют функцию периодического технического контроля силами пользователя. Как правило, она заключается в сканировании входящего в комплект поставки фантома, изображения которого обрабатываются в автоматическом режиме. Программное обеспечение выполняет расчет параметров качества визуализации, на основании которого может быть принято решение о корректности функционирования оборудования.

К сожалению, для рентгеновских аппаратов подобная функция самотестирования не реализована производителями. Однако, опыт коллектива авторов в выполнении контроля эксплуатационных параметров рентгеновских аппаратов позволяет предположить, что простая процедура сканирования тест-объекта для сотрудников отделения лучевой диагностики может быть излишне сложной и не реализуемой при большом потоке пациентов.

Высокое качество рентгенорадиологических исследований, связанное с минимальной лучевой нагрузкой на пациента и диагностической ценностью регистрируемых изображений, возможно только с использованием исправного рентгеновского аппарата. По этой причине в рамках жизненного цикла рентгенодиагностического оборудования наряду с техническим обслуживанием и периодическими техническими испытаниями (проводимыми аккредитованными испытательными лабораториями с периодичностью один раз в два-три года) следует проводить простые (рутинные) проверки до начала приема пациентов. Основная задача рутинных проверок состоит в том, чтобы с использованием максимально простых, ориентированных на рентгенолаборанта, методов контроля выявлять факт неисправности аппарата. При этом причина неисправности может быть определена в процессе дальнейших исследований, проводимых с привлечением представителей технических служб.

Из литературы [2] известен метод и его аппаратно-программная реализация, позволяющие оперативно оценивать состояние двух основных функциональных узлов цифрового рентгенодиа-

гностического аппарата – системы «рентгеновское питающее устройство и рентгеновский излучатель» (далее – рентгеновская часть), а также цифрового приемника. Однако необходимым условием проведения проверок в соответствии с данным методом является наличие специализированного тест-объекта, а также его точное позиционирование в центральной области цифрового рентгеновского приемника. При этом информативность метода для задач рутинного контроля, возможно, является избыточной, поскольку он ориентирован не только на обнаружение факта неисправности аппарата, но и на идентификацию этой неисправности путем оценок величин анодного напряжения, количества электричества, коэффициента передачи приемника и уровня его внутренних шумов.

Целью данного исследования была разработка упрощенной методики периодического технического контроля рентгеновского аппарата и проверки стабильности функционирования оборудования без использования специализированного тест-объекта. В работе представлены результаты теоретического и экспериментального исследования метода оперативной проверки работоспособности рентгенодиагностических аппаратов с цифровым приемником в условиях непрерывной работы отделения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Количественные характеристики качества изображения «чистого поля»

Предлагаемый метод ориентирован на оценку работоспособности цифрового рентгенодиагностического аппарата на основании определения параметров зарегистрированного изображения «чистого» поля (т.е. изображения, полученного в отсутствие тест-объекта во входной плоскости приемника). Разработка метода осуществлялась с использованием модели тракта приема и преобразования входного рентгеновского потока в цифровом приемнике, подробно описанной в [3]. В соответствии с этой моделью частотно зависимые значения уровня сигнала ($S_{\text{ВЫХ}}(u, v)$) и спектра мощности шума ($W_{\text{ВЫХ}}(u, v)$) на выходах каналов приемника оцениваются с помощью следующих выражений:

$$S_{\text{ВЫХ}}(u, v) = q \cdot \xi \cdot G \cdot MTF(u, v), \quad (1)$$

$$W_{\text{ВЫХ}}(u, v) = q \cdot \xi \cdot G^2 \cdot MTF^2(u, v) + N_{\text{ВН}}(u, v), \quad (2)$$

где q – плотность потока рентгеновских квантов на входе приемника; ξ – коэффициент поглощения рентгеновских квантов в приемнике; G – коэффициент передачи приемника; $MTF(u, v)$ – функция передачи модуляции; $N_{\text{вн}}(u, v)$ – спектр мощности внутренних шумов в каналах приемника; u и v – пространственные частоты.

В качестве оценки уровня сигнала используется среднее значение яркостей внутри подобласти изображения «чистого» поля (размер подобласти составляет порядка 100×100 пикселей). Математически это равноценно тому, что расчет проводится в области нулевых пространственных частот. Для данной области пространственных частот формулы (1) и (2) приобретают следующий вид ($MTF(0,0) = 1$):

$$S_{\text{вых}} = q \cdot \xi \cdot G, \quad (3)$$

$$W_{\text{вых}}(0,0) = q \cdot \xi \cdot G^2 + N_{\text{вн}}(0,0). \quad (4)$$

Дисперсию шумов на выходах каналов приемника ($\sigma_{\text{вых}}^2$) в этом случае можно оценить с использованием следующего выражения [2]:

$$\sigma_{\text{вых}}^2 = \frac{W_{\text{вых}}(0,0)}{A}, \quad (5)$$

где A – площадь чувствительной области парциального канала приемника.

Значение параметра ξ определяется, в основном, типом используемого сцинтиллятора, характеристики которого остаются неизменными на протяжении достаточно длительного периода времени эксплуатации оборудования. Так, например, в работе [4] отмечается неизменность характеристик сцинтилляционных детекторов в течение более 10 лет. Соответственно, для дальнейшего анализа влиянием этого параметра можно пренебречь, приняв его значение равным единице.

Исходя из сказанного, с учетом (5), перепишем выражения (3) и (4) в следующем виде:

$$S_{\text{вых}} = q \cdot G, \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{вых}}^2 = \frac{q \cdot G^2}{A} + \sigma_{\text{вн}}^2, \quad (7)$$

где $\sigma_{\text{вн}}^2$ – дисперсия внутренних шумов приемника ($\sigma_{\text{вн}}^2 = N_{\text{вн}}(0,0)/A$).

Путем преобразования выражения (7) с учетом (6) можно получить формулу для расчета квадрата выходного отношения сигнал/шум ($Q_{\text{вых}}^2$):

$$Q_{\text{вых}}^2 = q \cdot A \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{\text{вн}}^2}{\sigma_{\text{вых}}^2}\right). \quad (8)$$

Для упрощения дальнейшего анализа прием неизменное в процессе эксплуатации приемника значение параметра A равным единице.

Дисперсию внутренних шумов приемника можно оценить на основании изображения «чистого» поля, полученного при отсутствии экспозиции или, например, в процессе экспозиции с плотно закрытыми шторками диафрагмы (при ее наличии).

В случае бесперебойной работы аппарата на прием пациентов уровень квантовых шумов значительно превосходит уровень внутренних шумов приемника, и вкладом последних в суммарный выходной шум можно пренебречь. Тогда, предполагая указанный режим работы цифрового приемника, перепишем формулу (8) в следующем виде:

$$Q_{\text{вых}}^2 = q. \quad (9)$$

Формулы (6) и (9) дают возможность получить выражение для определения параметра G :

$$G = \frac{S_{\text{вых}}}{Q_{\text{вых}}}.$$

Таким образом, определяя по изображению «чистого» поля параметры $S_{\text{вых}}$ и $Q_{\text{вых}}$, можно контролировать параметр цифрового приемника G и параметр рентгеновской части аппарата q . Значение параметра q при заданном качестве излучения на аппарате (определяется величиной дополнительной фильтрации и значением анодного напряжения) и неизменном расстоянии «фокус-приемник» зависит только от радиационного выхода рентгеновского излучателя. Данный параметр, как известно, может служить мерой «старения» рентгеновской трубки и определяется на основании измеренного значения дозы на фиксированном расстоянии от фокуса рентгеновской трубки [5, 6].

АЛГОРИТМ КОНТРОЛЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РЕНТГЕНОВСКОГО АППАРАТА С ЦИФРОВЫМ ПРИЕМНИКОМ

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований был разработан алгоритм оперативного контроля работоспособности цифрового рентгенодиагностического аппарата, структура которого представлена на рис. 1.

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЦИФРОВЫХ РЕНТГЕНОДИАГНОСТИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДО НАЧАЛА ПРИЕМА ПАЦИЕНТОВ

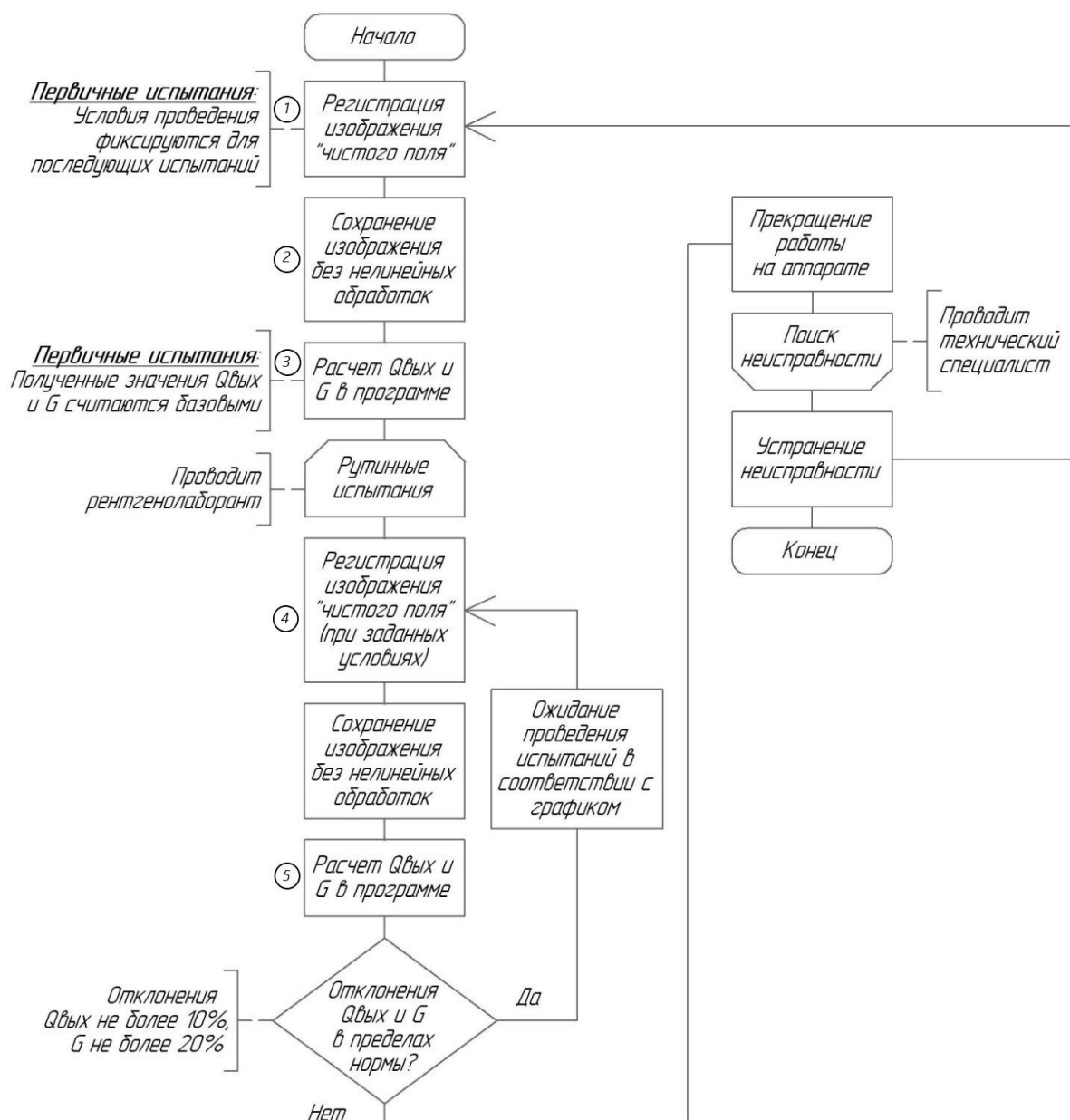


Рис. 1. Алгоритм оперативного контроля работоспособности цифрового рентгенодиагностического аппарата

Последовательность действий в соответствии с предложенным алгоритмом сводится к следующему:

1. Проводится первичное испытание на заведомо исправном аппарате с привлечением технических специалистов. В процессе данных испытаний регистрируется изображение «чистого» поля при заданных и неизменных в дальнейшем параметрах съемки. К параметрам съемки относятся уровни анодного напряжения и количества электричества, величина дополнительной фильтрации и расстояние «фокус-приемник». В случае если в аппарате имеется отсеивающий растр, он должен быть извлечен.

2. Зарегистрированное изображение должно быть сохранено с учетом отключения всех видов нелинейной обработки, а также без использования алгоритмов сжатия. Допустимы лишь виды обработок, представленные в стандарте [7].

3. С использованием специализированной программы SNR (ООО «КБ РентгенТест») по зарегистрированному изображению определяют параметры $S_{\text{вых}}$, $Q_{\text{вых}}$ и G . Полученные оценки параметров $Q_{\text{вых}}$ и G являются базовыми значениями и используются рентгенолаборантом в дальнейшем при рутинном контроле.

4. Регулярно, до начала приема пациентов рентгенолаборант воспроизводит условия проведения первичной проверки и регистрирует одно изображение «чистого» поля.

5. Далее на основании полученного изображения рассчитываются параметры $Q_{\text{вых}}$ и G . Полученные оценки автоматически сравниваются с базовыми значениями. Выход значения хотя бы одного параметра за установленные пределы (10 и 20 % соответственно) является основанием для приостановки работы рентгеновского аппарата и привлечения технического специалиста.

Чрезмерное отклонение (более 20 %) значения параметра G от базового уровня свидетельствует о неисправности приемника.

Чрезмерное отклонение (более 10 %) значения параметра $Q_{\text{вых}}$ от базового уровня будет служить сигналом к тому, что возникла неисправность в рентгеновской части аппарата. В ряде случаев причина может заключаться и в некорректной работе приемника или обоих узлов сразу.

Исследование и разработка метода оперативного контроля проводились с использованием комплекса рентгеновского диагностического цифрового «РЕНЕКС-РЦ» производства ООО «С.П. ГЕЛПИК», оснащенного плоскопанельным цифровым приемником на базе аморфного кремния (размер чувствительной поверхности приемника – 43×43 см; размер канала приемника по обеим координатам – 0.139 мм). Аппарат для апробации был выбран исходя из большой распространенности эксплуатации в практике отделения лучевой диагностики. Только в медицинских организациях Департамента здравоохранения г. Москвы на момент 2023 г. установлено более 60 подобных аппаратов. Данные рентгеновские аппараты широко применяются для массовых профилактических исследований грудной клетки.

Ежемесячно регистрировались изображения «чистого» поля при следующих параметрах съемки: величина анодного напряжения – 70 кВ, величина дополнительного алюминиевого фильтра – 22 мм (таким образом обеспечивалось качество излучения, близкое к RQA5 [6]), величина анодного тока – 100 мА, длительность экспозиции – 100 мс, расстояние «фокус-приемник» – 100 см. Размер радиационного поля был ограничен границами линий центрального перекрестия, нанесенного на поверхность кожуха с цифровым приемником (контроль осуществлялся по световому полю).

Используемые параметры съемки практически гарантировали выполнение условия, заключающегося в обеспечении пренебрежимо малого вклада внутренних шумов приемника в оценку суммарного шума на выходах каналов детектора. Так, за все время наблюдений вклад внутреннего шума в оценку суммарного шума приемника не превышал 1 %.

В процессе проведения исследований отсеивающий растр был извлечен из кожуха приемника. Расчет параметров $S_{\text{вых}}$, $Q_{\text{вых}}$ и G осуществлялся с помощью разработанного программного обеспечения. При сохранении изображений были отключены все виды нелинейных обработок. Измерение дозы во входной плоскости цифрового приемника проводилось с использованием дозиметра универсального для контроля характеристик рентгеновских аппаратов Piranha R&F/M 657, который во время исследований располагался по центру на поверхности кожуха приемника (расстояние от фокуса рентгеновского излучателя до поверхности кожуха приемника составляло 96.5 см).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Была разработана упрощенная методика периодического технического контроля рентгеновского аппарата и проверки стабильности функционирования оборудования без использования специализированных тест-объектов.

В табл. 1 представлены результаты исследования. Первая строка таблицы отражает первичные (исходные) значения оцениваемых параметров, а остальные (с порядковыми номерами 2–7) – результаты ежемесячной проверки. В таблице также присутствуют столбцы с нормированными значениями параметров (данные значения получены путем деления соответствующих величин на результаты первичных испытаний). За все время наблюдений измеренные значения дозы во входной плоскости приемника варьировались в диапазоне 15.62–17.05 мкГр.

Из представленных в табл. 1 данных видно, что в ходе проведения исследований оцененные значения отношения сигнал/шум ($Q_{\text{вых}}$) отличались от первоначальных данных не более чем на 5 %. Данный диапазон отклонений соответствует диапазону колебаний измеренных значений дозы. Таким образом, оценка $Q_{\text{вых}}$ позволяет контролировать состояние рентгеновской части аппарата. Также из таблицы видно, что отклонение рассчитанных значений коэффициента

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЦИФРОВЫХ РЕНТГЕНОДИАГНОСТИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДО НАЧАЛА ПРИЕМА ПАЦИЕНТОВ

передачи приемника (G) от исходных данных при неизменном в процессе исследований коэффициенте передачи в приемнике не превышает 4 %.

Экспертным способом были установлены допустимые диапазоны изменения параметров $Q_{\text{вых}}^2$ и G равными ± 20 %, а допустимый диапазон изменения параметра $Q_{\text{вых}}$ составил ± 10 %.

На используемом в исследовании комплексе рентгеновском диагностическом цифровом «РЕНЕКС-РЦ» производства ООО «С.П. ГЕЛ-ПИК» была дважды выполнена процедура контроля эксплуатационных параметров рентгеновского аппарата согласно [8] до начала и в период проведения исследования. Подтверждена техническая исправность аппарата и возможность эксплуатации рентгеновского аппарата в медицинской организации.

Таблица 1. Результаты исследования

Номер измерения	$S_{\text{вых}}$	$S_{\text{вых}}$, нормир. знач.	$Q_{\text{вых}}$	$Q_{\text{вых}}$, нормир. знач.	G	G , нормир. знач.
1	8853.43	1.00	58.05	1.00	2.63	1.00
2	8802.60	0.99	58.09	1.00	2.61	0.99
3	8271.65	0.93	55.06	0.95	2.73	1.04
4	8640.50	0.98	58.03	1.00	2.57	0.98
5	8823.60	1.00	58.16	1.00	2.61	0.99
6	8631.70	0.97	56.23	0.97	2.73	1.04
7	8410.90	0.95	55.99	0.96	2.68	1.02

ОБСУЖДЕНИЕ

На данный момент проверка технического состояния рентгеновского аппарата осуществляется один раз в два года в рамках технической паспортизации, а также при первичной установке оборудования. Процедура контроля эксплуатационных параметров рентгеновского аппарата проводится по [8] и включает в себя проверку параметров и характеристик рентгеновского и питающего устройства и рентгеновского излучателя, параметров и характеристики тракта формирования рентгеновских изображений и механических характеристики штативных устройств. При этом контролируются качество излучения, точность установки анодного напряжения и длительности экспозиции, форма кривой анодного напряжения, линейность изменения дозы излучения, уровень радиационного выхода рентгеновского излучателя, совпадение оптического и рентгеновского полей, перпендикулярность рабочего пучка по отношению к поверхности приемника рентгеновского изображения. Для оценки качества работы цифрового приемника могут контролироваться следующие характеристики: размер рабочего поля, неравномерность распределения яркости в поле изображения, геометрические искажения, пространственная разрешающая способность, контраст-

ная чувствительность, квантовая эффективность регистрации как функция пространственных частот и дозы в плоскости приемника, отношение сигнал/шум [8]. Все эти методы проводятся квалифицированным инженерным составом, предполагают определенную подготовку и использование испытательного оборудования.

В литературе встречаются способы оценки качества рентгеновских изображений с помощью тест-объектов. Так, например, в работе [9] описан способ объективной оценки качества цифровых изображений, которая осуществлялась по отношению сигнал/шум изображения пластины теста контрастной чувствительности (ТКЧ) с использованием специального объекта, состоящий из ТКЧ и теста пространственного разрешения, размещенных за водным фантомом, имитирующим среднего пациента. Данный способ объективной оценки качества цифровых изображений позволил определить оптимальные режимы регистрации снимков органов грудной клетки для цифровых рентгенографических аппаратов с целью минимизации дозовой нагрузки на пациентов.

На повышение точности контроля и сокращение времени проведения технической проверки направлены патенты [10, 11] за счет использования контрольной прямоугольной рентгеноконтрастной мелкоструктурной решетки,

примыкающей к входному окну приемника излучения, последующий визуальный анализ и измерение изображения контрольной решетки на экране видеомонитора, подключенного к компьютеру в первом случае, и за счет использования и получения изображений устройства для оценки функции передачи модуляции приемника рентгеновского изображения по методу «острого края» во втором случае.

На упрощение проверки технического состояния рентгеновского аппарата до начала приема пациентов и получение в ее процессе проверки однозначного ответа об исправности узлов рентгеновского аппарата направлен также патент [12]. Предлагается использование тест-объекта, представляющего собой квадратную алюминиевую подложку, на поверхности которой закреплены шесть пластин разной формы и толщины. Оценка полученных изображений проводится также по значениям отношения сигнал/шум и коэффициента передачи приемника рентгеновского изображения. Время, необходимое на проведение тестирования, не превышает 5–10 мин.

В работе [13] выдвигается предположение о возможности использования изображений, засвеченных рентгеновским излучением поля для объективного контроля параметров цифрового приемника без использования тест-объектов.

С учетом развития PACS-систем может быть использовано программное обеспечение для автоматической обработки результатов и уведомления ответственного сотрудника медицинской организации о необходимости диагностики работы аппарата. Метод разработан на универсальном рентгеновском диагностическом комплексе «РЕНЕКС-РЦ» с возможностью малодозовой флюорографии, широко применяемом для проведения профилактических исследований органов грудной клетки. Комплекс рентгеновский диагностический цифровой «РЕНЕКС-РЦ» является достаточно распространенным аппаратом, в медицинских организациях Департамента здравоохранения г. Москвы числится более 60 таких аппаратов, а комплексов рентгеновских диагностических цифровых «РЕНЕКС-2», оснащенных аналогичным плоскопанельным цифровым приемником – более 120 шт., что составляет около 20 % парка рентгеновских аппаратов г. Москвы. Результаты выполненных процедур контроля качества показали применимость описанного подхода.

Отклонение предложенных характеристик от референсного (установленного при техническом

контроле) уровня может говорить о вероятной поломке. Это важная проблема, так как по информации из ежегодного отчета форма № 30 [14] в медицинских организациях г. Москвы в 2022 г. числилось 685 единиц рентгеновских аппаратов, из которых 28 % не работали. Согласно данным модуля управления материальным обеспечением Единой медицинской информационно-аналитической системы г. Москвы (УМО ЕМИАС) простой аппаратов из-за неисправности занимает лидирующую позицию в списке причин неэффективной работы оборудования отделений лучевой диагностики. В масштабах мегаполиса это приводит к огромной нагрузке на систему здравоохранения и значительным финансовым расходам: требуется заказ запчастей, выполнение ремонта, перенаправление пациентов, оплата простоя медицинского персонала. Актуально обеспечение корректного функционирования оборудования и для радиационной безопасности, в том числе – персонала [15, 16]. И это мы не учитываем вопросы недостаточной диагностики пациентов из-за отказов от выполнения исследований.

Разработанный метод при условии незначительной модернизации может быть применен не только для рентгенодиагностических аппаратов, но и для ангиографов, маммографов, двухэнергетических рентгеновских денситометров и компьютерных томографов, в том числе и в автоматизированном режиме обработки данных [17]. Контроль двух последних групп оборудования особенно актуален в связи с их использованием в количественных измерениях, требующих метрологического обеспечения. Отдельно следует сказать о количественных измерениях, выполняемых в лучевой диагностике. Применительно к данной категории диагностического оборудования это, в первую очередь, минеральная плотность кости [18, 19]. А если мы говорим об измерениях, контроль корректности функционирования применяемого в качестве средства измерения оборудования особенно важен с точки зрения метрологического обеспечения.

Предложенный подход, если внедрить его в практику медицинских организаций Департамента здравоохранения г. Москвы, с учетом наличия Единого Радиологического Информационного Сервиса ЕМИАС, позволит с минимальной нагрузкой на персонал медицинских организаций обеспечить постоянный мониторинг всего парка оборудования.

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЦИФРОВЫХ РЕНТГЕНОДИАГНОСТИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДО НАЧАЛА ПРИЕМА ПАЦИЕНТОВ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была разработана упрощенная методика периодического технического контроля рентгеновского аппарата и проверки стабильности функционирования оборудования. Разработка была проведена на комплексе рентгеновском диагностическом цифровом «РЕНЕКС-РЦ» производства ООО «С.П. ГЕЛПИК». В исследовании показана работоспособность метода.

Предлагаемый метод позволяет определять факт неисправности рентгенодиагностического аппарата с цифровым приемником без использования каких-либо тест-объектов во входной плоскости детектора. Метод прост в реализации: время, затрачиваемое на проведение испытаний, как правило, не превышает 5 мин. Оперативный контроль работоспособности цифровых рентгенодиагностических аппаратов рекомендуется проводить до начала приема пациентов не реже одного раза в неделю.

ОГРАНИЧЕНИЯ

Ограничением исследования является факт разработки метода на одном аппарате – комплексе рентгеновский диагностический цифровой «РЕНЕКС-РЦ» в течение всего шести месяцев. Для внедрения метода в практику медицинских организаций требуется расширить число аппаратов и моделей аппаратов при апробации метода.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная статья подготовлена авторским коллективом в рамках НИОКР «Разработка и создание аппаратно-программного комплекса для оппортунистического скрининга остеопороза», (№ ЕГИСУ: 123031400007-7) в соответствии с приказом от 21.12.2022 № 1196 «Об утверждении государственных заданий, финансовое обеспечение которых осуществляется за счет средств бюджета города Москвы государственным бюджетным (автономным) учреждениям, подведомственным Департаменту здравоохранения города Москвы, на 2023 год и плановый период 2024 и 2025 годов» Департамента здравоохранения г. Москвы.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хальфин Р.А. Технический паспорт на рентгеновский диагностический кабинет, утвержденный Руководителем Департамента организации и развития медицинской помощи населению, Минздрава России. 02.08.2002 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902282084> (дата обращения 29.09.2023).
2. Кручинин С.А. Методика рутинного контроля цифровых рентгенодиагностических аппаратов // Медицинская техника, 2019. Т. 5. С. 32–34.
3. Зеликман М.И. Цифровые системы в медицинской рентгенодиагностике. М.: ОАО «Издательство «Медицина», 2007. С. 208.
4. Гринев. Б.В., Никулина Р.А., Вершинина С.П., Виноград Э.Л. Исследование старения сцинтилляционных детекторов // Атомная энергия. 1991. Т. 70. № 1. С. 50–51.
5. Основы рентгенодиагностической техники / Под ред. Н.Н. Блинова: Учебное пособие. М.: Медицина, 2002. С. 392.
6. МР № 0100/12883-07-34. Определение радиационного выхода рентгеновских излучателей медицинских рентгенодиагностических аппаратов. М.: Роспотребнадзор, 2008.
7. ГОСТ ИЕС 62220-1-2011. Изделия медицинские электрические. Характеристики цифровых приемников рентгеновского изображения. Ч. 1. Определение квантовой эффективности регистрации. М.: Стандартинформ, 2013. С. 28.
8. МР № 16. Методы и аппаратно-программные средства оценки параметров и характеристик цифровой рентгенодиагностической аппаратуры в условиях эксплуатации (утв. Департаментом здравоохранения г. Москвы 24.04.2009). М., 2009.
9. Бехтерев А.В., Лабусов В.А., Лохтин Р.А., Пьянов Д.А., Строков И.И., Храмов М.С. Поиск объективных критериев качества цифровых рентгеновских изображений для оптимизации режимов их регистрации по отношению качество/доза // Russian Electronic Journal of Radiology, 2019. Т. 9. № 1. С. 160–176. DOI: 10.21569/2222-7415-2019-9-1-160-176.
10. Кантер Б.М., Ратобильский Г.В., Серова Е.В., Черный А.Н. Патент № 2352254. Российская Федерация, МПК А61В6/03. Способ контроля геометрического качества изображения цифрового рентгенодиагностического аппарата. Заявка № 2007139041/14, 23.10.2007. Опубликовано 20.04.2009.
11. Блинов Н.Н., Зеликман М.И., Кабанов С.П., Кручинин С.А. Патент № 2330612. Российская Федерация, МПК А61В6/03. Устройство для оценки функции передачи модуляции приемников рентгеновского изображения по методу «острого края». Заявка № 2006139874/14, 14.11.2006. Опубликовано 10.08.2008.
12. Зеликман М.И., Кручинин С.А. Патент № 2714447. Российская Федерация, МПК А61В6/03.

Способ контроля и оценки работоспособности основных узлов цифрового рентгеновского аппарата и устройство для его осуществления. Заявка № 2019125650, 14.08.2019. Опубликовано 17.02.2020.

13. Мазуров А.И. Оценка параметров цифровых приемников по равномерно засвеченному рентгеновскими лучами рабочему полю // Увидеть невидимое: Сб. науч. тр. / Под. ред. А.И. Мазурова. СПб.: Книжный Дом, 2008. С. 152–156.

14. Отчет форма № 30 «Сведения о медицинской организации» Департамента здравоохранения г. Москвы за 2022 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=44&documentId=45678> (дата обращения: 29.09.2023).

15. Ryzhkin S.A., Druzhinina Y. V., Ohrimenko S.E., Lantukh Z.A. and etc. Problems of personnel irradiation in modern medical technologies // Digital Diagnostics. 2023. V. 4. № 2. P. 142–155. DOI: 10.17816/DD375327.

16. Основы менеджмента медицинской визуализации / С.П. Морозов, Л.Д. Линденбратен, П.Г. Габай

[и др.]. М.: ООО Издательская группа «ГЭОТАР-Медиа», 2020. 432 с. DOI: 10.33029/9704-5247-9-MEN-2020-1-424.

17. Кручинин С.А., Васильев Ю.А., Петрайкин А.В. Программное обеспечение для контроля технического состояния рентгеновского излучателя и цифрового детектора рентгенодиагностических систем общего назначения (DTG). Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023665712 от 19.07.2023.

18. Петрайкин А.В., Скрипникова И.А. Количественная компьютерная томография, современные данные. Обзор // Медицинская визуализация. 2021. Т. 25. № 4. С. 134–146. DOI:10.24835/1607-0763-1049.

19. Петрайкин А.В., Ахмад Е.С., Семенов Д.С., Артюкова З.Р., Кудрявцев Н.Д., Петрайкин Ф.А., Низовцова Л.А. Сравнение двух энергетических денситометров различных моделей // Травматология и ортопедия России. Т. 28. № 2. С. 48–57. DOI: 10.17816/2311-2905-1731.

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI», 2023, vol. 12, no. 6, pp. 357–367

OPERATIONAL MONITORING OF THE OPERABILITY OF DIGITAL X-RAY DIAGNOSTIC DEVICES BEFORE THE START OF PATIENT ADMISSION

M.R. Akhmedzyanova¹, M.I. Zelikman², S.A. Kruchinin¹, Z.A. Lantukh^{1,*}, I.V. Soldatov¹, Y.A. Vasilev¹,
Yu.V. Druzhinina^{1,**}, A.O. Tolokonskiy³

¹Moscow Center for Diagnostics and Telemedicine, Moscow, 127051, Russia

²Limited Liability Company «Design Bureau Rentgentest», Moscow, 105318, Russia

³National Nuclear Research University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409, Russia

*e-mail: LantukhZA@zdrav.mos.ru

**e-mail: DruzhininaYV2@zdrav.mos.ru

Received October 18, 2023; revised October 19, 2023; accepted November 07, 2023

For qualitative work of X-ray diagnostic equipment and simple detection of the fact of malfunction should be carried out routine checks and focused on the X-ray operator. The purpose of the article was to develop a simplified approach to periodical technical control of X-ray equipment and to verify the equipment functioning stability without the use of a specialized test object. The article presents the results of theoretical and experimental study of the method of operative checking the operability of X-ray diagnostic machines with digital receptor in the conditions of continuous functioning of the department. The presented method is oriented on the estimation of digital X-ray diagnostic apparatus operability based on the determination of the parameters of the registered image obtained in the absence of the test-object in the input plane of the receptor and the further estimation of the output signal-to-noise ratio and the receptor transmission coefficient. An algorithm for operational control of the digital X-ray diagnostic apparatus efficiency was developed. The expert method was used to determine the valid ranges of key image parameters changes. The study shows the operability of the method and its simplicity.

Keywords: operational control; quality control; digital X-ray diagnostic apparatus; digital receptor.

REFERENCES

1. *Khalfin R.A.* Tekhnicheskij pasport na rentgenovskij diagnosticheskij kabinet approved by the Head of the Department of Organization and Development of medical care to the population, Ministry of Health of Russia. 02.08.2002 g. [Technical passport for the X-ray diagnostic office. 02.08.2002]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/902282084> (accessed 29.09.2023) (in Russian).
2. *Kruchinin S.A.* Metodika rutinnogo kontrolya cifrovyyh rentgenodiagnosticheskikh apparatov [Methodology of routine control of digital X-ray diagnostic devices]. Medicinskaya tekhnika, 2019. Vol. 5. Pp. 32–34 (in Russian).
3. *Zelikman M.I.* Cifrovye sistemy v medicinskoj rentgenodiagnostike [Digital systems in medical X-ray diagnostics]. Moscow, JSC «Publishing House «Medicine»» Publ., 2007. 208 p. (in Russian).
4. *Grinev B.V., Nikulina R.A., Vershinina S.P., Vinograd E.L.* Issledovanie stareniya scintillyacionnyh detektorov [Investigation of aging of scintillation detectors]. Atomnaya energiya, 1991. Vol. 70. No. 1. Pp. 50–51 (in Russian).
5. Osnovy rentgenodiagnosticheskoy tekhniki. Uchebnoe posobie. pod red. N.N. Blinova [Fundamentals of X-ray diagnostic technology. Textbook. Edited by N.N. Blinov]. Moscow, Medicine Publ., 2002. 392 p. (in Russian).
6. MR No. 0100/12883-07-34. «Opredelenie radiacionnogo vyhoda rentgenovskikh izluchatelej medicinskih rentgenodiagnosticheskikh apparatov» [MR No. 0100/12883-07-34. «Determination of the radiation output of X-ray emitters of medical X-ray diagnostic devices»]. Moscow: Rospotrebnadzor Publ., 2008 (in Russian).
7. GOST IEC 62220-1-2011. Izdeliya medicinskie elektricheskie. Harakteristiki cifrovyyh priemnikov rentgenovskogo izobrazheniya. CHast' 1. Opredelenie kvantovoj effektivnosti registracii. [State Standard IEC 62220-1-2011. Medical electrical products. Characteristics of digital X-ray image receivers. Part 1. Determination of the quantum efficiency of registration]. Moscow: Standartinform Publ., 2013. 28 p. (in Russian).
8. MR No. 16 «Metody i apparatno-programmnye sredstva ocenki parametrov i harakteristik cifrovoy rentgenodiagnosticheskoy apparatury v usloviyah ekspluatatsii» utverzhdennye Departamentom zdravoohraneniya goroda Moskvy 24.04.2009 [MR No. 16. «Methods and hardware and software tools for evaluating the parameters and characteristics of digital X-ray diagnostic equipment under operating conditions» approved by the Department of Health of the City of Moscow on 24.04.2009]. Moscow, 2009 (in Russian).
9. *Bekhterev A.V., Labusov V.A., Lokhtin R.A., Pyanov D.A., Stokov I.I., Khramov M.S.* Poisk ob"ektivnykh kriteriev kachestva cifrovyyh rentgenovskikh izobrazhenij dlya optimizacii rezhimov ih registracii po otnosheniyu kachestvo/doza [Search for objective quality criteria for digital x-ray images to optimize their acquisition modes in terms of the quality/doze ratio]. Russian Electronic Journal of Radiology, 2019. Vol. 9. No. 1. Pp. 160–176. DOI: 10.21569/2222-7415-2019-9-1-160-176 (in Russian).
10. *Kanter B.M., Ratobylsky G.V., Serova E.V., Cherniy A.N.* Sposob kontrolya geometricheskogo kachestva izobrazheniya cifrovogo rentgenodiagnosticheskogo apparata [A method for controlling the geometric image quality of a digital X-ray diagnostic device]. Patent RF, no. 2352254, IPC A61B6/03. Application No. 2007139041/14, 23.10.2007. Published 20.04.2009 (in Russian).
11. *Blinov N.N., Zelikman M.I., Kabanov S.P., Kruchinin S.A.* Ustrojstvo dlya ocenki funkcii peredachi modulyacii priemnikov rentgenovskogo izobrazheniya po metodu «ostrogo kraja» [A device for evaluating the modulation transmission function of X-ray image receivers using the «sharp edge» method]. Patent RF, No. 2330612, IPC A61B6/03. Application No. 2006139874/14, 14.11.2006. Published on 10.08.2008 (in Russian).
12. *Zelikman M.I., Kruchinin S.A.* Sposob kontrolya i ocenki rabotosposobnosti osnovnykh uzlov cifrovogo rentgenovskogo apparata i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya [A method for monitoring and evaluating the operability of the main components of a digital X-ray machine and a device for its implementation]. Patent RF, No. 2714447, IPC A61B6/03. Application no. 2019125650, 14.08.2019. Published on 17.02.2020 (in Russian).
13. *Mazurov A.I.* Ocenka parametrov cifrovyyh priemnikov po ravnomerno zasvechennomu rentgenovskimi luchami rabochemu polyu [Estimation of parameters of digital receivers on the working field uniformly illuminated by X-rays]. Sbornik nauchnykh trudov «Uvidet' nevidimoe». pod red. A.I. Mazurova [Collection of scientific papers «To see the invisible». edited by A. I. Mazurov]. St. Petersburg, «Book House» Publ., 2008. Pp. 152–156 (in Russian).
14. Svedeniya o medicinskoj organizacii [Information about a medical organization] Report Form no. 30, Moscow Department of Health, 2022. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=44&documentId=45678> (accessed 29.09.2023) (in Russian).
15. *Ryzhkin S.A., Druzhinina Y.V., Ohrimenko S.E., Lantukh Z.A. and etc.* Problems of personnel irradiation in modern medical technologies. Digital Diagnostics, 2023. Vol. 4. No. 2. Pp. 142–155. DOI: 10.17816/DD375327
16. *Morozov S.P., Lindenbraten L.D., Gabay P.G. et al.* Osnovy menedzhmenta medicinskoj vizualizacii [Basic principles of medical organization management]. Moscow, Limited liability company GEOTAR-Media Publishing Group, 2020. Pp. 432. ISBN 978-5-9704-5247-9. DOI: 10.33029/9704-5247-9-MEN-2020-1-424 (in Russian).
17. *Kruchinin S.A., Vasilev Y.A., Petraikin A.V.* Programmnoe obespechenie dlya kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya rentgenovskogo izluchatelya i cifrovogo detektora rentgenodiagnosticheskikh sistem

obshchego naznacheniya (DTG). [Software solution to monitor the technical condition of X-ray scanners and digital detectors of general-purpose X-ray diagnostic devices (DTG)]. Computer software registration certificate, no. 2023665712, 19.07.2023 (in Russian).

18. *Petraikin A.V., Skripnikova I.A.* Kolichestvennaya komp'yuternaya tomografiya, sovremennye dannye. Obzor [Quantitative Computed Tomography, modern data. Review]. *Medicinskaya vizualizaciya*, 2021. Vol. 2. No. 4. Pp. 134–146. DOI: 10.24835/1607-0763-1049 (in Russian).

19. *Petraikin A.V., Akhmad E.S., Semenov D.S., Artyukova Z.R., Kudryavtsev N.D., Petriikin F.A., Nizovtsova L.A.* Sravnenie dvuhenergeticheskikh densitometrov razlichnykh modelej [Different Models of Dual-Energy Bone DXA Scanners: A Comparative Study]. *Travmatologiya i ortopediya Rossii*, 2022. Vol. 28. No. 2. Pp. 48–57. DOI: 10.17816/2311-2905-1731 (in Russian).