

УДК 537.8: 004.9

UDC 537.8: 004.9

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РАДИОПРОЗРАЧНЫХ СЛОИСТЫХ СРЕД В СРЕДЕ MATLAB

COMPUTER MODELING AND OPTIMIZATION OF RADIOTRSPARENT LAYER ENVIRONMENTS IN THE ENVIRONMENT MATLAB

В. М. Зеленкевич,
*кандидат технических наук, доцент
кафедры физики и методики пре-
подавания физики Белорусского
государственного педагогического
университета имени Максима Танка;*

Д. И. Чечко,
*инженер-программист центра
развития информационных технологий
Белорусского государственного
педагогического университета
имени Максима Танка*

V. Zelenkevich,
*PhD in Technical Sciences, Associate
Professor of the Department of Physics
and Methods of Teaching Physics,
Belarusian State Pedagogical University
named after Maxim Tank;*

D. Chechko,
*Engineer-Programmer
of the Center of Development
of Informational Technologies,
Belarusian State Pedagogical
University named after Maxim Tank*

Поступила в редакцию 14.05.20.

Received on 14.05.20.

В статье описан и реализован в пакете прикладных программ Matlab алгоритм численного моделирования и оптимизации радиопрозрачных слоистых структур.

Ключевые слова: физическая задача, радиопрозрачные слоистые структуры, компьютерное моделирование, математическая модель, параметрическая оптимизация.

The article describes and realizes the algorithm of numerical modeling and optimization of radiotransparent layer structures in the pack of applied programs Matlab.

Keywords: physical problem, radiotransparent layer structures, computer modeling, mathematical model, parametrical optimization.

Введение. В XXI веке, в условиях обучения в высокотехнологичной информационно-образовательной среде, происходит смена образовательной парадигмы и формируется новый взгляд на процессы получения новых знаний [1–2]. Особое место в этой трансформации занимает *парадигма моделирования* как особая технология познания [3]. Компьютерное моделирование уже давно является эффективным инструментом научных исследований. Наряду с традиционным делением физики на экспериментальную и теоретическую сегодня можно выделить третий фундаментальный раздел – **вычислительная физика** (*computational physics*), – который приближает процесс обучения к научному поиску, что в настоящее время является принципиально важным с точки зрения педагогики. Часто компьютерное моделирование в физике называют вычислительным

экспериментом, поскольку оно имеет много общего с лабораторным экспериментом. Поэтому будущие педагоги обязательно должны владеть технологией компьютерного моделирования, уметь исследовать различные физические явления и процессы с помощью компьютера [3].

Очень часто для решения такого рода задач используются специальные пакеты прикладных программ, компьютерные среды (*Maple, Matlab, MathCAD* и т. п.), работающие в режиме реального времени. Среда Matlab объединяет математические вычисления, визуализацию и мощный технический язык. Встроенные интерфейсы позволяют получить быстрый доступ и извлекать данные из внешних устройств, файлов, внешних баз данных и программ. Кроме того, Matlab дает возможность интегрировать внешние процедуры, написанные на языках Си, Си++,

Фортран, и Java с Matlab приложениями [4–5].

На физико-математическом факультете БГПУ уже несколько лет ведется разработка модели организации образовательного процесса, ориентированной на обучение физике с использованием элементов телекоммуникационных и сетевых технологий [2–3,6], в рамках которой апробировались методики формирования у студентов обобщенных умений работы с учебной литературой по физике при организации их работы с мультимедийными цифровыми образовательными ресурсами.

Основная часть. В данной работе ставилась задача исследования возможности применения пакета Matlab для моделирования радиопрозрачных слоистых структур. Объединение в одном пакете программирования, методов оптимизации и визуализации результатов расчетов позволяет существенно обогатить учебный процесс, повысить его методический уровень и наглядность теории, значительно уменьшить время на выполнение индивидуальных заданий и обеспечить глубокое овладение современными компьютерными технологиями. По этим причинам внедрение Matlab в учебный процесс является актуальной задачей высшей школы.

Компьютерное моделирование используется для описания и анализа физических процессов разнообразной природы, в частности волн различной физической природы, распространяющихся в материальных средах [7].

Для решения этих задач необходимо уметь синтезировать многослойные радиопрозрачные структуры с заданными свойствами. Основные трудности, встречающиеся при использовании оптимизационных методов для решения задачи синтеза радиопрозрачных структур, связаны в основном с построением адекватного показателя качества (*оптимизационной модели*), выбором математического аппарата оптимизации этой модели и оценкой оптимальности полученных результатов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: *исследовать характерные особенности целевых функций, используемых при параметрической оптимизации радиопрозрачных слоистых структур; провести сравнительный анализ методов параметрической оптимизации радиопрозрачных слоистых сред на определенной группе тестовых функций; провести сравнительный анализ математических моделей слоистых сред; разработать программное обеспечение для инте-*

рактивной оптимизации радиопрозрачных структур на базе пакета Matlab.

Выбор конструкции радиопрозрачной структуры и последующее определение параметров слоев требует решения двух задач:

1) *первая (прямая) задача* заключается в расчете энергетических (спектральные и угловые зависимости коэффициентов отражения пропускания и т. п.) и фазовых (фазовые сдвиги) характеристик радиопрозрачной структуры;

2) *вторая задача (собственно задача синтеза)* является обратной по отношению к первой.

Прежде всего необходимо сформулировать оптимизационную задачу, которая должна включать *критерий эффективности, ряд независимых переменных, а также ограничения в виде равенств и неравенств*, которые и образуют *модель рассматриваемой радиопрозрачной слоистой структуры* (рисунок 1). Необходимо также сформулировать логически обоснованные допущения, выбрать форму представления модели, уровень ее детализации и метод реализации на персональном компьютере.

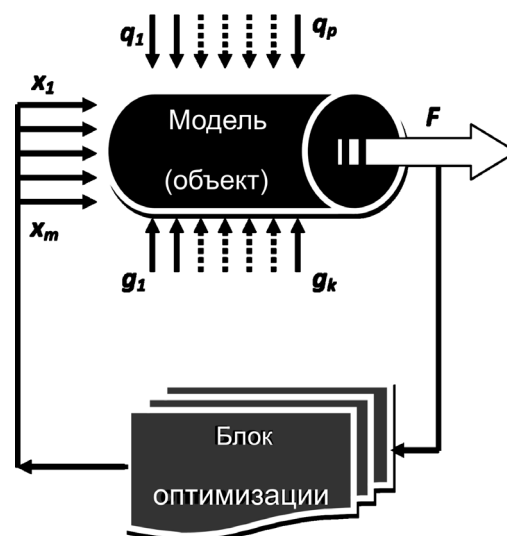


Рисунок 1 – Структура оптимизационной модели

Как мы уже отмечали, чтобы сделать методы оптимизации объектно-инвариантными, необходимо выделить специфику оптимизируемого объекта посредством такого понятия, как **оптимизационная модель** (рисунок 1). Под оптимизационной моделью радиопрозрачной слоистой структуры будем понимать совокупность математических понятий, описывающих ее как объект оптимизации, а также соотношений, связывающих эти понятия.

Основными компонентами оптимизационной модели являются параметры оптимизации ($x_1, x_2, \dots, x_{2m}$), оптимизируемые функции ($F_1, F_2, \dots, F_n$), критерии оптимизации F , ограничения ($g_1, g_2, \dots, g_k$) и связывающие их соотношения ($q_1, q_2, \dots, q_p$).

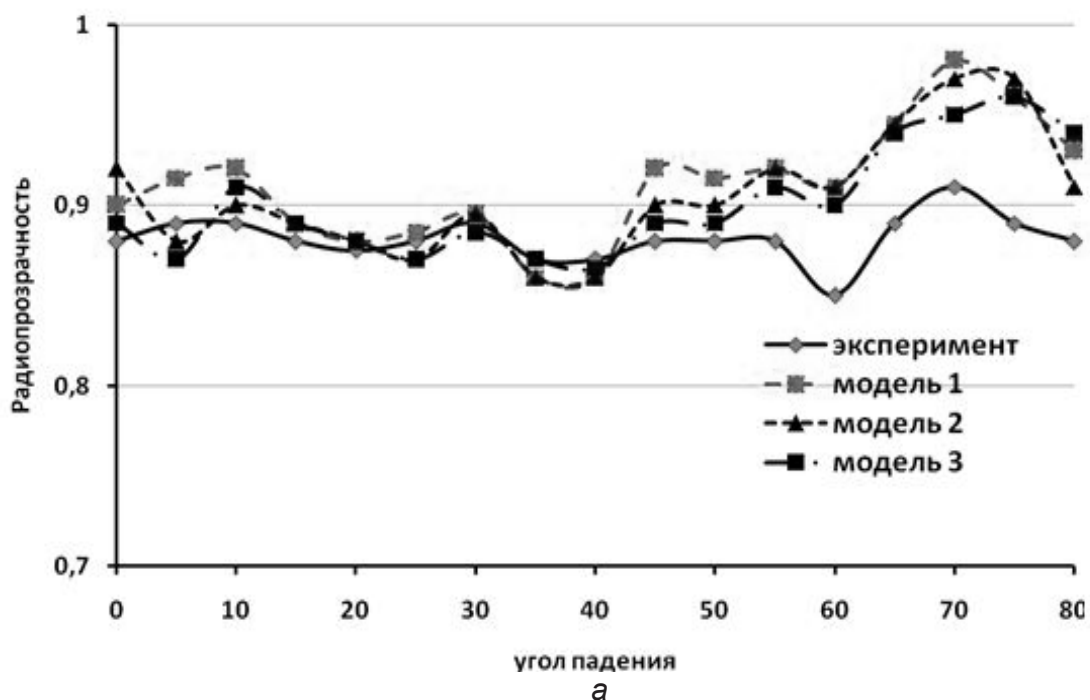
Авторами был разработан программный комплекс «*Параметрическая оптимизация радиопрозрачных структур*», реализующий различные алгоритмы расчета слоистых структур, ориентированные на работу в пакете Matlab. При выборе модели для описания слоистой радиопрозрачной структуры было использовано понятие характеристической матрицы слоистой структуры, элементы которой являются результатом решения уравнений Максвелла, описывающих распространение электромагнитной волны в слоистой среде [7]. Представление решения в матричной форме особенно удобно для численных расчетов с использованием пакета Matlab, основной особенностью которого являются его широкие возможности по работе с матрицами [4–5].

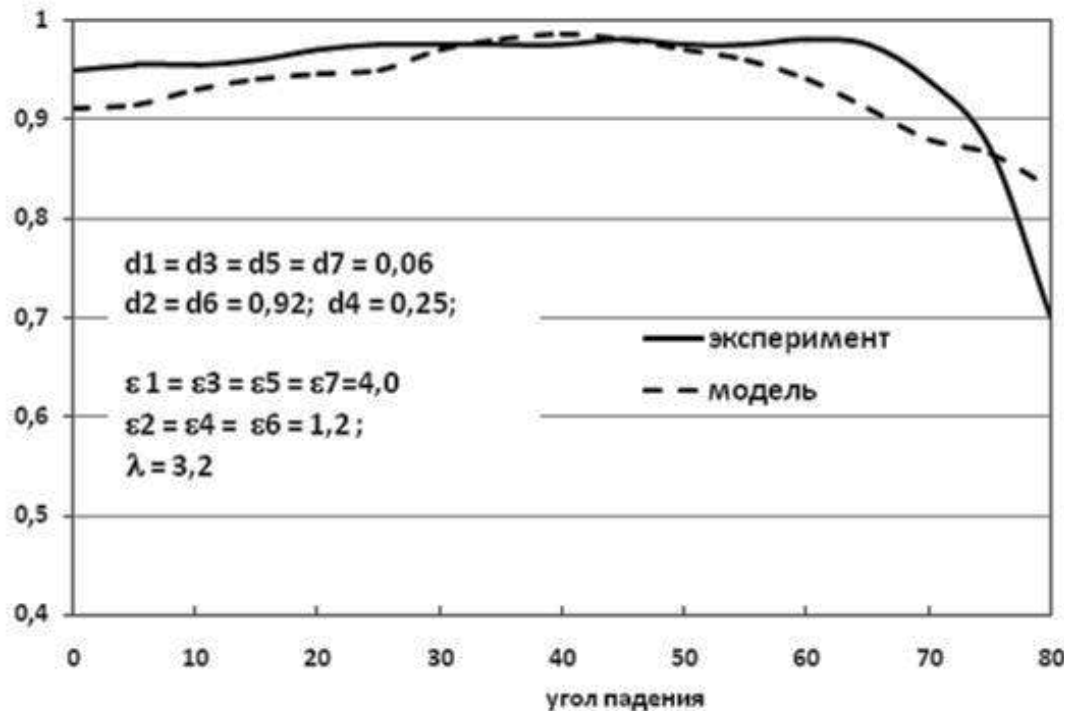
Для оценки точности математических моделей радиопрозрачных слоистых сред, в частности матричного метода, были проведены сравнения результатов моделирования различных радиопрозрачных конструкций с экспериментальными данными. На рисунке 2а представлены результаты вычислительного эксперимента трех моделей для трехслойной конструкции, а на рисунке 2б –

результаты расчета семислойной структуры с помощью матричного метода (*модель 1*).'

Как уже отмечалось, большинство задач оптимизации радиопрозрачных слоистых структур относится к задачам математического программирования. Сущность их сводится к отысканию такой совокупности параметров структуры, которая доставляет экстремум (минимум или максимум) некоторой целевой функции от показателей эффективности радиопрозрачной слоистой структуры. Прежде всего отметим, что постановка любой задачи оптимизации предполагает наличие следующих обязательных компонентов: *математической модели объекта оптимизации*; *области определения или существования модели* (другими словами, всех ограничений, которые требуют своего учета); *критерия оптимальности* (или целевой функции); собственно *формулировку задачи* (что требуется найти и в каком виде).

В соответствии с этим алгоритмом было разработано программное обеспечение для различных методов оптимального поиска, адаптированных для работы в среде Matlab. В качестве примера рассмотрим задачу параметрического синтеза семислойной радиопрозрачной структуры с использованием метода ЛПГ-поиска и метода случайных направлений с пересчетом. Ставилась задача проектирования семислойной конструкции, обеспечивающей радиопрозрачность не ниже 0,8 в диапазоне углов падения от 0° до 60° для двух длин волн λ_1 и λ_2 ($\lambda_1/\lambda_2 = 2,5$).





б

Рисунок 2

Сформульована вище задача може бути формалізована в виді:

$$\begin{aligned}
 &F_1(x, Q_i, \lambda_i) = \min; \\
 &x \in D_x; Q_i \in [0^\circ, 60^\circ]; \lambda_i = \lambda_1; \\
 &F_2(x, Q_k, \lambda_k) = \min; \\
 &x \in D_x; Q_k \in [0^\circ, 60^\circ]; \lambda_k = \lambda_2; \\
 &0,015 \leq x_i \leq 0,03, \quad i = 1, 3, 5, 7; \\
 &0,2 \leq x_k \leq 0,4, \quad k = 2, 4, 6; \\
 &4,0 \leq x_m \leq 6,0, \quad m = 8, 10, 12, 14; \\
 &1,2 \leq x_n \leq 2,0, \quad n = 9, 11, 13;
 \end{aligned}$$

Задача в такій постановці є двукритеріальною з однородними критеріями F_1 і F_2 . Простір пошуку D_x утворюється двома підпросторами: $D_d = \{d\}$ – простір варіюваних товщин шарів; $D_\epsilon = \{\epsilon\}$ – простір варіюваних діелектричних проникностей матеріалів шарів. Кожне з підпросторів має розмірність $N = 7$. Многокритеріальна задача може бути зведена до задачі пошуку умовного екстремума:

$$\begin{aligned}
 &\min F_1(x, Q_i, \lambda_i), \\
 &\text{при } F_2(x, Q_k, \lambda_k) \geq 0,8; \\
 &x \in D_x; \lambda_k = \lambda_2.
 \end{aligned}$$

На рисунку 3 наведені результати моделювання оптимізованої семислойної радіопрозрачної конструкції для $\lambda = \lambda_1$ (крива 1) і $\lambda = \lambda_2$ (крива 2). Оптиміальна конструкція має наступні параметри: $d_1 = d_3 = d_5 = d_7 = 0,01\lambda_1$; $d_2 = d_6 = 0,125\lambda_1$; $d_4 = 0,12\lambda_1$; $\epsilon_1 = \epsilon_3 = \epsilon_5 = \epsilon_7 = 4,0$; $\epsilon_2 = \epsilon_4 = \epsilon_6 = 1,2$; $\text{tg}\delta_1 = \text{tg}\delta_3 = \text{tg}\delta_5 = \text{tg}\delta_7 = 0,003$; $\text{tg}\delta_2 = \text{tg}\delta_4 = \text{tg}\delta_6 = 0,002$.

Проведені дослідження підтвердили ефективність застосування методів випадкового пошуку при розв'язанні задач умовної оптимізації параметрів радіопрозрачних шаруватих структур. Широко застосовуваний *метод найшвидшого спуску* достатньо чутливий до вибору початкової точки і неефективний при наявності оврагів у мінімізуваній функції. Перспективний метод *Девідона – Флетчера – Паулла*, що дозволяє достатньо швидко (за 5–10 кроків) знаходити локальний екстремум. Однак цей метод менш чутливий до оврагів цільових функцій. Одним з ефективних методів аналізу виду гіперповерхні відклику цільової функції є *метод оврагів*, що дозволяє розшукувати не тільки локальні екстремуми, але й глобальні. Простими для програмування і застосування є *методи сліпого пошуку з пересчетом*. Ці методи цілеспрямовано застосовують для мінімізації багатокритеріальних функцій. Вони особливо ефективні на початкових стадіях пошуку. При ком-

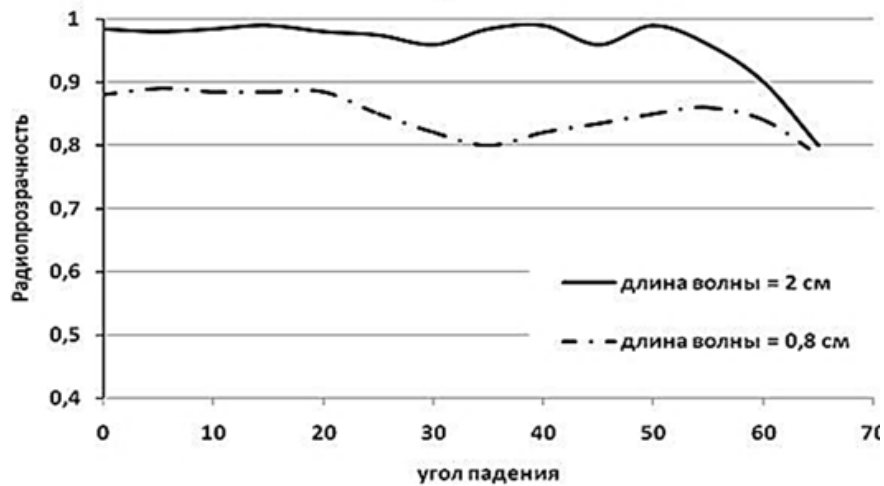


Рисунок 3

бинации их с детерминированными методами поиска (например, в методе, называемом *ЛПт-поиска*) можно с большой скоростью и точностью разыскивать глобальные экстремумы. Сочетание метода *ЛПт-поиска* и *методов прямого поиска* позволяет получать приемлемые результаты при многоэкстремальной, многопараметрической целевой функции, которые очень часто встречаются в практике проектирования радиопрозрачных слоистых структур.

В новой версии Matlab дескрипторная графика позволяет создавать любые детали со-

временного *пользовательского интерфейса*. Однако надо отметить, что пока она не поддерживает визуально-ориентированное программирование, при котором генерация нужных кодов осуществляется автоматически визуальным выбором нужного объекта интерфейса и размещением его в необходимом месте. Такой вид программирования поддерживает пакет Simulink. На рисунке 4 приведен пример визуализации результатов вычислительного эксперимента в разработанном программном комплексе «Параметрическая оп-

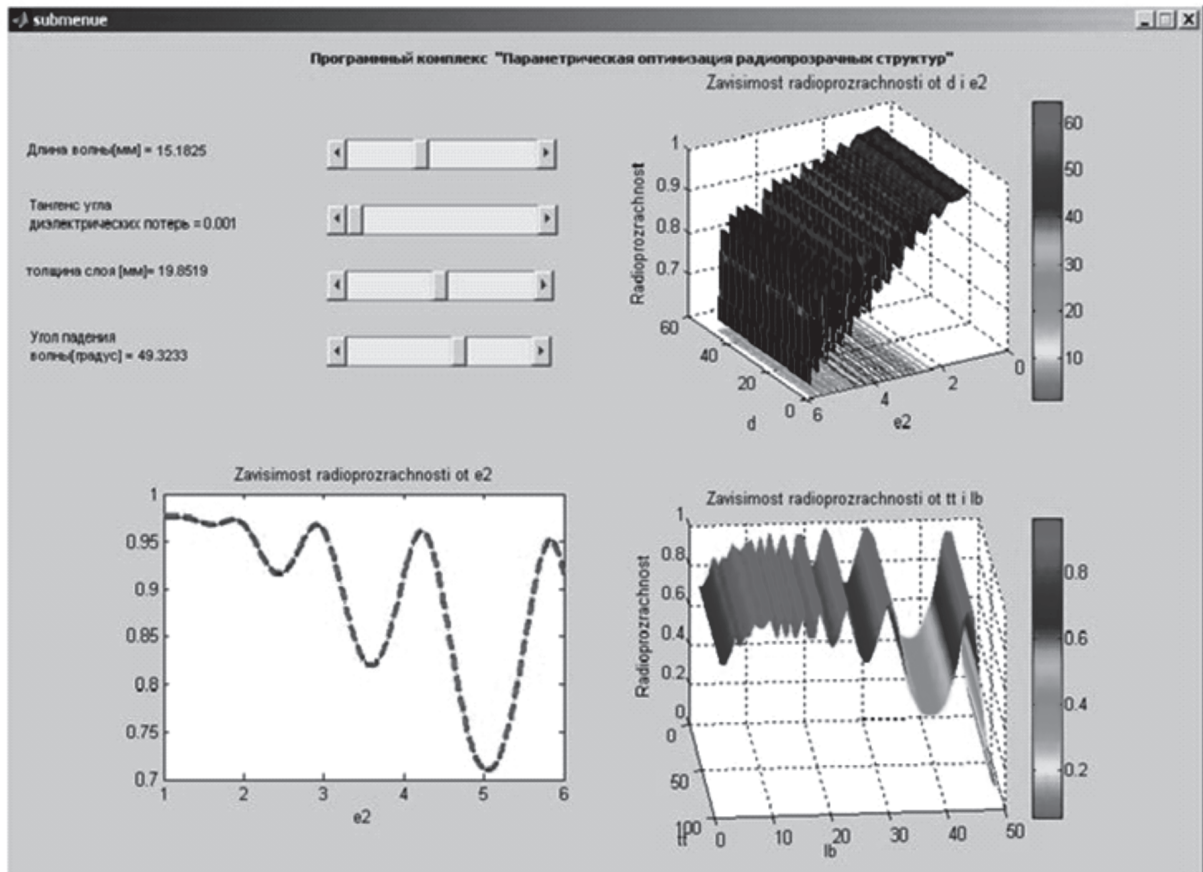


Рисунок 4

тимизация радиопрозрачных структур», разработанного в среде Matlab для визуализации результатов интерактивного вычислительного эксперимента анализа и оптимизации радиопрозрачных слоистых структур.

Заклучение. В статье рассмотрена лишь небольшая часть технологических возможностей, которые предоставляет нам среда Matlab.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жук, А. И. Информатизация образовательного процесса учреждения высшего образования: от дистанционных технологий к электронному обучению / А. И. Жук // Адукацыя і выхаванне. – 2016. – № 6. – С. 3–8.
2. Зеленкевич, В. М. Использование сервисов Web 2.0 при изучении школьной физики / В. М. Зеленкевич, Е. В. Гусева // Дидактика сетевого урока: материалы международной онлайн-конференции, г. Минск, 17–18 нояб. – 2016 г. – Минск : БГПУ, 2016. – С.12–16.
3. Зеленкевич, В. М. Внедрение современных электронных средств в практику обучения физике / В. М. Зеленкевич, И. М. Елисеева // БГУ: Информатизация образования-2014: педагогические аспекты создания и функционирования виртуальной образовательной среды: материалы международной конференции. – Минск, 2014. – С. 184–186.
4. Ревинская, О. Г. Основы программирования в Matlab : учебное пособие / О. Г. Ревинская. – БХВ-Петербург, СПбУ., 2016. – 208 с.
5. Коткин, Г. Л. Компьютерное моделирование физических процессов с использованием MATLAB: учеб. пособие / Г. Л. Коткин, В. С. Черкасский. – Новосибирск, 2001. – 173 с.
6. Собаль, В. Р. Камп'ютарныя анімацыі – сродак павышэння эфектыўнасці працэсу вывучэння фізікі / В. Р. Собаль, Ч. М. Федаркоў, А. А. Бардовіч // Весці БДПУ. Серыя 3. – 2018. – № 2. – С. 37–42.
7. Бреховских, Л. М. Волны в слоистых средах / Л. М. Бреховских. – М. : Наука, 1973. – 343 с.

Следует заметить, что персональный компьютер не должен заменять традиционные средства обучения. Дополняя друг друга, они образуют инновационную систему средств обучения, ориентированную на использование новых информационных технологий, применение которых создает условия для эффективного обучения физике в информационно насыщенной образовательной среде.

REFERENCES

1. Zhuk, A. I. Informatizaciya obrazovatel'nogo processa uchrezhdeniya vysshego obrazovaniya: ot distancionnyh tekhnologij k elektronnomu obucheniyu / A. I. Zhuk // Adukacyya i vyhavanne. – 2016. – № 6. – S. 3–8.
2. Zelenkevich, V. M. Ispol'zovanie servisov Web 2.0 pri izuchenii shkol'noj fiziki / V. M. Zelenkevich, E. V. Guseva // Didaktika setevogo uroka: materialy mezhdunarodnoj onlajn-konferencii, g. Minsk, 17–18 noyab. – 2016 g. – Minsk : BGPU, 2016. – S.12–16.
3. Zelenkevich, V. M. Vnedrenie sovremennyh elektronnyh sredstv v praktiku obucheniya fizike / V. M. Zelenkevich, I. M. Eliseeva // BGU: Informatizaciya obrazovaniya-2014: pedagogicheskie aspekty sozdaniya i funkcionirovaniya virtual'noj obrazovatel'noj sredy: materialy mezhdunarodnoj konferencii. – Minsk, 2014. – S. 184–186.
4. Revinskaya, O. G. Osnovy programmirovaniya v Matlab : uchebnoe posobie / O. G. Revinskaya. – BHV-Peterburg, SPbU., 2016. – 208 s.
5. Kotkin, G. L. Komp'yuternoe modelirovanie fizicheskikh processov s ispol'zovaniem MATLAB: ucheb. posobie / G. L. Kotkin, V. S. Cherkasskij. – Novosibirsk, 2001. – 173 s.
6. Sobal', V. R. Kamp'yutarnyya animacyi – srodak pavyshennya efektyŭnasci pracesu vyvuchennya fiziki / V. R. Sobal', Ch. M. Fedarkou, A. A. Bardovich / Vesci BDP. Seryya 3. – 2018. – № 2. – S. 37–42.
7. Brekhovskih, L. M. Volny v sloistyh sredah / L. M. Brekhovskih. – M. : Nauka, 1973. – 343 s.