

ЗАДАЧА РАССЕЯНИЯ ДЛЯ МОДЕЛЬНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ ДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ В ПРИКЛАДНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ПАКЕТАХ

А.В. Тихоненко

*Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,
г. Обнинск*



В работе формулируются модели, конструирующие двух- и трехгорбые потенциалы деления ядер тяжелых элементов, и описывается комплекс программ для получения (в рамках моделей) точных решений для волновых функций, вычисления коэффициента прохождения, визуализации результатов и вычисления физических параметров с применением функциональных алгоритмов в среде прикладного математического пакета MAPLE.

Согласно идеям В. Струтинского [1–3] и многочисленные данные о сечениях деления [4–8] свидетельствуют о наличии двух и более локальных максимумах потенциального барьера деления для ядер тяжелых элементов от ^{229}Ra до ^{247}Ca . В частности, двугорбый барьер деления позволил объяснить такие явления, как спонтанное деление изомеров, резонансы в подбарьерном делении, запаздывающее деление и некоторые другие экспериментальные данные.

Существует ряд подходов к моделированию таких потенциалов; они могут моделироваться, в частности, с помощью многопрофильных прямоугольных барьеров и квадратичных функций (полуклассические подходы рассмотрены, например, [9, 10], а точные численные расчеты коэффициента прохождения для таких потенциалов можно найти в работах [11, 12]).

Вычисление коэффициента прохождения для модельных потенциалов такого типа представляет важную научную и прикладную проблему в области ядерной энергетики. Такая задача является сложной, прежде всего, в математическом плане и требует разработки различных алгоритмов и использования компьютерных программ для решения дифференциальных уравнений, систем алгебраических уравнений, громоздких вычислений и преобразований. Кроме того, необходимы значительные вычислительные ресурсы для визуализации и получения численных значений характерных параметров.

Рассмотрим ряд моделей барьера с двумя (модели I, II и III) и тремя локальными максимумами (модели IV и V); и, используя MAPLE, проведем вычисления волновых функции, коэффициента прохождения и некоторых физических пара-

© А.В. Тихоненко, 2007

метров (в постановке одномерной задачи рассеяния – в пределе малых энергий [11, 12, 15]).

1. СТРУКТУРА КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ

Для построения моделей потенциальных барьеров и вычисления коэффициента прохождения в рамках этих моделей разработаны комплексы программ в среде прикладного математического пакета MAPLE, состоящие из трех программ для модели I с многопрофильным прямоугольным потенциалом и пяти программ (табл. 1, для модели I программы 1–2 отсутствуют) для каждой модели, использующей квадратичные функции. При этом модели II и III конструируют двугорбые, а модели IV и V – трехгорбые потенциалы. Кроме того, потенциалы отличаются сложностью построения (в моделях III и V обеспечивают гладкие переходы к нулевому значению на границах) и вычислениями коэффициента прохождения, а основные этапы алгоритмического решения задачи рассеяния в них совпадают).

Таблица 1

Комплексы программ для построения модельных потенциалов и вычисление коэффициента прохождения

№	Назначение программы	Выходные данные программы
1	Моделирование потенциала с помощью трех (для модели II) или пяти (для модели III) квадратичных функций.	Набор параметров парабол и координат точек их гладкого сшивания (используются затем в программах 2 и 5).
2	Решение уравнения Шредингера для двух типов областей (с нулем и квадратичным потенциалами).	Функциональные выражения для волновых функций (используются затем в программе 3).
3	Вычисление потоков вероятности и определения коэффициента прохождения с использованием алгебраических и дифференциальных соотношений.	Функциональные зависимости (используются затем в программе 4).
4	Вычисление потоков вероятности и определения коэффициента прохождения с использованием алгебраических и дифференциальных соотношений.	Функциональные зависимости (используются затем в программе 5).
5	Визуализация и получения численных значений физических параметров.	Графики волновых функций и зависимостей параметров и численные их значения.

Программы представляют собой рабочие листы пакета MAPLE и реализуются в MAPLE на входном языке заданием операторов и функций, а также использованием встроенных инструментов пакета.

2. МОДЕЛИ ПОТЕНЦИАЛОВ

Рассмотрим модели двугорбного и трехгорбного потенциалов. В модели I двугорбый барьер строится совокупностью трех прямоугольных барьеров (рис. 1а) различной величины ($n = 1, 2, 3$):

$$V_I(x) = \begin{cases} 0 & (x < a_0, x > a_3; a_0 = 0) \\ V_{0n} & (a_{n-1} < x < a_n) \end{cases},$$

где V_{0i} – постоянные, определяющие «высоты» прямоугольных барьеров, a_n – размерные параметры, определяющие их границы.

В модели II двугорбый барьер строится совокупностью трех квадратичных функций (рис. 1б) (x соответствует ядерному параметру деформации [11]), которые гладко сшиваются в точках a_n :

$$V_{II}(x) = \begin{cases} 0 & (x < a_0, x > a_3; a_0 = 0) \\ V_n(x) & (a_{n-1} < x < a_n; V_n(x) = V_{0n} - \frac{1}{2} \cdot (-1)^n \cdot \mu \cdot \omega_n^2 \cdot (x - x_n)^2) \end{cases}.$$

При этом V_{02} и V_{04} – локальные максимумы (в точках x_2 и x_4 соответственно), а V_{03} – локальный минимум (в точке x_3) потенциальной энергии; величины $\mu \cdot \omega_j^2$ – описывают кривизны парабол; μ – эффективная масса частиц, которая определяется массовым числом A :

$$\mu = 0.0540 \cdot A^{5/3} \cdot \hbar^2 / M.$$

В модели III двугорбый барьер строится совокупностью пяти квадратичных функций (рис. 1в), которые гладко сшиваются в точках a_j ($j = 1, 2, 3, 4, 5$):

$$V_{III}(x) = \begin{cases} 0 & (x < a_0, x > a_5; a_0 = 0) \\ V_j(x) & (a_{j-1} < x < a_j; V_j(x) = V_{0n} + \frac{1}{2} \cdot (-1)^j \cdot \mu \cdot \omega_j^2 \cdot (x - x_j)^2; V_{01} = V_{05} = 0) \end{cases}.$$

Заметим, что в этом случае обеспечиваются гладкие переходы к нулевому значению потенциальной энергии в точках $x_1 = 0$ и $x_5 = a_5$.

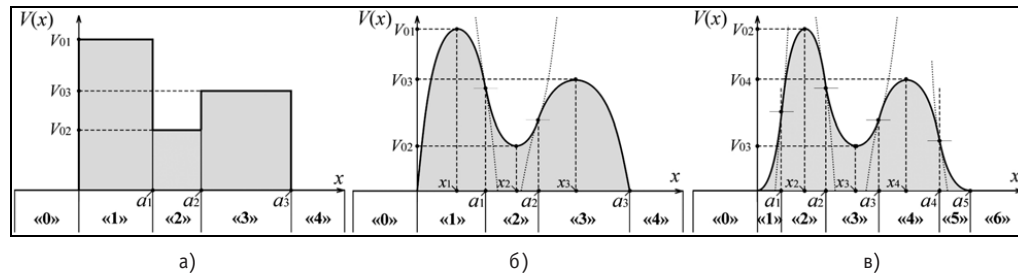


Рис. 1. Модели двугорбых потенциалов

В модели IV трехгорбый барьер строится совокупностью пяти квадратичных функций, которые гладко сшиваются в точках a_j (рис. 2а).

В модели V трехгорбый барьер строится совокупностью семи квадратичных функций, которые гладко сшиваются в точках a_m ($m = 1, 2, \dots, 7$; рис. 2б). В этом случае обеспечиваются гладкие переходы к нулевому значению потенциальной энергии в точках $x_1 = 0$ и $x_7 = a_7$.

Заметим, что функциональные соотношения для V_{IV} и V_V аналогичны формулам для V_{II} и V_{III} соответственно.

Для третьей моделей II – V алгоритм вычисления коэффициента прохождения одинаков и включает несколько программируемых операций (в модели I нет необходимости выполнять процедуру сшивания потенциальных функций и решать уравнение Шредингера – его решения в этом случае представляют собой экспоненциальные функции).

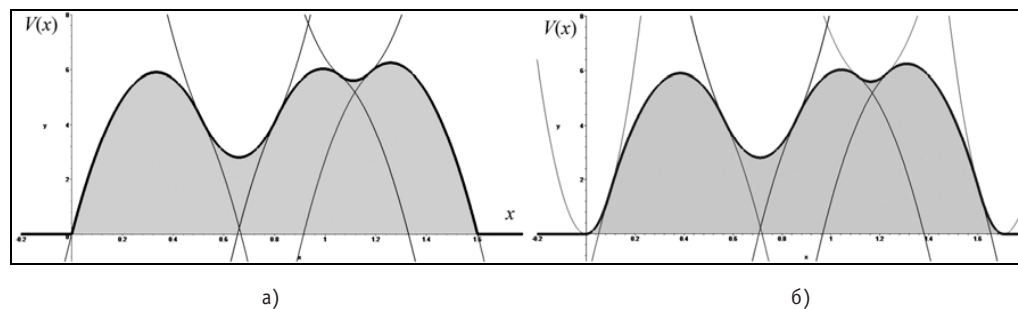


Рис. 2. Модели IV (а) и V (б) трехгорбых потенциалов

3. АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

Приведем основные этапы алгоритмического решения задачи на примере модели III.

1. Моделирование потенциального барьера (программа 1).

1.1. Введение модельных потенциальных функций.

1.2. Программирование гладкого «сшивания» волновых функций – ввод системы уравнений (в точках $x = 0$ и $x_5 = a_5$ гладкость обеспечивается выбором вида функции V_1 и V_5 , а штрих означает производную по x , $l = 1, 2, 3, 4$):

$$V_l(x)|_{x \rightarrow a_l} = V_{l+1}(x)|_{x \rightarrow a_l}, \quad V'_l(x)|_{x \rightarrow a_l} = V'_{l+1}(x)|_{x \rightarrow a_l},$$

которые после подстановки потенциальных функций принимают вид:

$$\begin{cases} V_{0l} - \frac{1}{2} \cdot (-1)^l \cdot \mu \cdot \omega_l^2 \cdot (a_l - x_l)^2 = V_{0l+1} - \frac{1}{2} \cdot (-1)^{l+1} \cdot \mu \cdot \omega_{l+1}^2 \cdot (a_{l+1} - x_{l+1})^2 \\ (-1)^l \cdot \mu \cdot \omega_l^2 \cdot (a_l - x_l) = (-1)^{l+1} \cdot \mu \cdot \omega_{l+1}^2 \cdot (a_{l+1} - x_{l+1}) \end{cases}.$$

1.3. Решение системы уравнений; определение параметров $x_2, x_3, x_4, x_5, a_1, a_2, a_3, a_4$ ($a_5 = x_5$):

$$a_j = x_j + \frac{\sqrt{2 \cdot (-1)^j \cdot (V_{0j} - V_{0j+1}) \cdot \omega_{j+1}}}{\sqrt{\mu \cdot (\omega_j^2 + \omega_{j+1}^2)} \cdot \omega_j}, \quad x_{j+1} = a_j \cdot \left(1 + \frac{\omega_j^2}{\omega_{j+1}^2}\right).$$

1.4. Визуализация потенциальной функции (для некоторого набора параметров) с двумя локальными максимумами (рис. 1в).

2. Решение уравнения Шредингера (программа 2).

2.1. Программирование уравнения Шредингера в промежутках $0 < x < a_1, a_1 < x < a_2, a_2 < x < a_3, a_3 < x < a_4, a_4 < x < a_5$:

$$\frac{\partial^2 \psi_j(x)}{\partial x^2} + \frac{2 \cdot \mu}{\hbar^2} \cdot \left(E - V_{0j} + \frac{1}{2} \cdot \mu \cdot \omega_j^2 \cdot (x - x_j)^2 \right) \cdot \psi_j(x) = 0,$$

которые после преобразований принимают вид:

$$\frac{\partial^2 \psi_j(x)}{\partial x^2} + \left(K_j^2 + \lambda_j^2 \cdot (x - x_j)^2 \right) \cdot \psi_j(x) = 0,$$

где обозначено

$$\lambda_1 = \frac{i \cdot \mu \cdot \omega_1}{\hbar}, \lambda_2 = \frac{\mu \cdot \omega_2}{\hbar}, \lambda_3 = \frac{i \cdot \mu \cdot \omega_3}{\hbar}, \lambda_4 = \frac{\mu \cdot \omega_4}{\hbar}, \lambda_5 = \frac{i \cdot \mu \cdot \omega_5}{\hbar}, K_j = \frac{\sqrt{2 \cdot (E - V_{0j})}}{\hbar},$$

$$k = \frac{\sqrt{2 \cdot E}}{\hbar}.$$

2.2. Программное решение уравнения Шредингера в промежутках $0 < x < a_1, a_1 < x < a_2, a_2 < x < a_3, a_3 < x < a_4, a_4 < x < a_5$ с использованием встроенного оператора решения дифференциальных уравнений «dsolve» (${}_1F_1$ – вырожденная гипергеометрическая функция [16]):

$$\begin{aligned} \psi_j(x) = & A_j \cdot {}_1F_1\left([a], \left[\frac{1}{2}\right], \lambda_j \cdot i \cdot (x - x_j)^2\right) \cdot e^{-i/2 \lambda_j \cdot x \cdot (x - 2x_j)} + \\ & + B_j \cdot {}_1F_1\left(\left[a + \frac{1}{2}\right], \left[\frac{3}{2}\right], \lambda_j \cdot i \cdot (x - x_j)^2\right) \cdot (x - x_j) \cdot e^{-i/2 \lambda_j \cdot x \cdot (x - 2x_j)}, \quad \left(a_j = \frac{1}{4} \cdot (1 + i \cdot K_j^2 / \lambda_j)\right). \end{aligned}$$

2.3. Программный ввод волновых функций для пяти областей (после переопределения констант, присваиваемых пакетом по умолчанию):

$$\psi_0(x) = e^{i \cdot k \cdot x} + B_0 \cdot e^{-i \cdot k \cdot x}, \psi_6(x) \text{ (см. выше)}, \psi_6(x) = A_6 \cdot e^{i \cdot k \cdot x}.$$

3. «Сшивание» волновых функций и определение коэффициентов A_i и B_i (программа 3).

3.1. Программирование системы уравнений для гладкого «сшивания» волновых функций (штрих означает производную по x):

$$\psi'_j(x)|_{x \rightarrow a_j} = \psi'_{j+1}(x)|_{x \rightarrow a_j}, \quad \psi'_j(x)|_{x \rightarrow a_j} = \psi'_{j+1}(x)|_{x \rightarrow a_j}.$$

Эта система может быть представлена в виде:

$$\begin{cases} 1 + B_0 = A_1, & A_5 \cdot F_{55} = A_6 \\ \left\{ A_l \cdot F_{ll} + B_l \cdot G_{ll} = A_{l+1} \cdot F_{l,l+1} + B_{l+1} \cdot G_{l,l+1} \right\}' & \left\{ (1 - B_0) \cdot i \cdot k = B_1, \quad B_5 \cdot g_{55} = A_6 \cdot i \cdot k \right\} \end{cases}$$

где использованы обозначения (приводятся только некоторые из них)

$$F_{11} = {}_2F_1\left([a_1], \left[\frac{1}{2}\right], \alpha_1\right) \cdot e^{-\alpha_1/2} \quad (\alpha_1 = \lambda_1 \cdot i \cdot a_1^2),$$

$$g_{11} = \left({}_1F_1\left([a_1 + \frac{1}{2}], \left[\frac{3}{2}\right], \alpha_1\right) \cdot (1 - \lambda_1 \cdot a_1^2) + \frac{4 \cdot i \cdot \lambda_1 \cdot (a_1 + \frac{1}{2})}{3} \cdot {}_1F_1\left([a_1 + \frac{3}{2}], \left[\frac{5}{2}\right], \alpha_1\right) \right) \cdot e^{-\alpha_1/2},$$

...

3.2. Решение системы, определение коэффициентов (получаемое решение очень громоздко и здесь не приводится).

4. Вычисление потоков вероятности и вычисление коэффициента прохождения.

4.1. Задание падающей, отраженной и прошедшей волн (падающая волна записывается с амплитудой, равной единице):

$$\psi_{\text{inc}}(x) = e^{i \cdot k \cdot x}, \quad \psi_{\text{out}}(x) = B_0 \cdot e^{-i \cdot k \cdot x}, \quad \psi_{\text{tr}}(x) = A_6 \cdot e^{i \cdot k \cdot x}.$$

4.2. Вычисление потоков вероятности падающей, отраженной и прошедшей волн. Потоки вероятности вычисляются по формулам [13]

$$j(x) = \frac{i \cdot \hbar}{2 \cdot \mu} \cdot (\psi(x) \cdot \overline{\psi'(x)} - \overline{\psi(x)} \cdot \psi'(x))$$

и равны для падающей и прошедшей волн соответственно:

$$J_{\text{inc}}(x) = \frac{\hbar \cdot k}{\mu}, \quad J_{\text{tr}}(x) = |A_6|^2 \cdot \frac{\hbar \cdot k}{\mu}.$$

4.3. Вычисление коэффициента прохождения. Эта величина вычисляется по формуле [14] и оказывается равной

$$T = \frac{J_{\text{tr}}(x)}{J_{\text{in}}(x)} = |A_6|^2,$$

где A_6 определено выше (и полное выражение для коэффициента прохождения здесь не приводится).

5. Визуализация полученных результатов.

5.1. Графики зависимостей волновой функции от координаты и коэффициента прохождения от энергии частицы и параметров барьера (рис. 3–5).

5.2. Получение численных значений физических параметров (см. п.4).

4. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ В РАМКАХ МОДЕЛИ III

Получение численных значений физических параметров, исследование результатов (включая сравнение с данными, известными в литературе) проведем на примере модели III. При этом воспользуемся исходными [11] и дополнительными

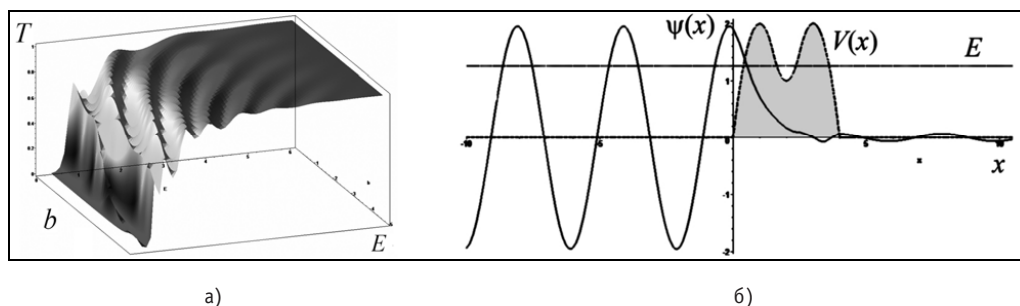


Рис. 3. Визуализация результатов, полученных в рамках моделей I и II (а – зависимость коэффициента прохождения от энергии частицы и ширины второго барьера b в рамках модели I, б – потенциал, энергия частицы и волновая функция для двух значений энергии частицы в рамках модели II)

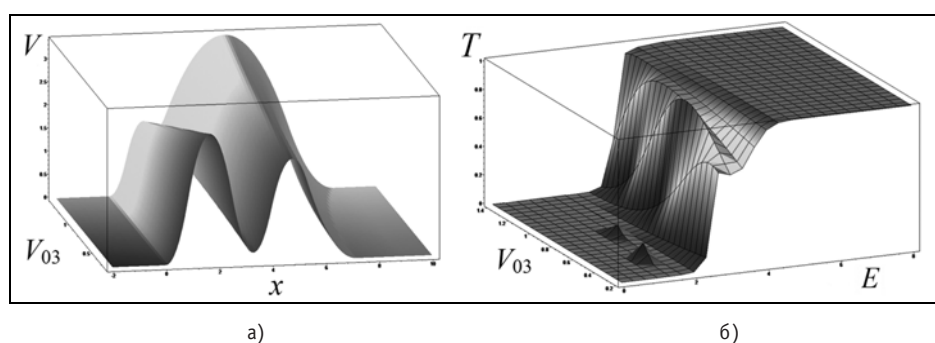


Рис. 4. Визуализация результатов, полученных в рамках модели III (а – зависимость потенциала от координаты и параметра V_{03} , б – зависимость коэффициента прохождения от энергии частицы и параметра V_{03})

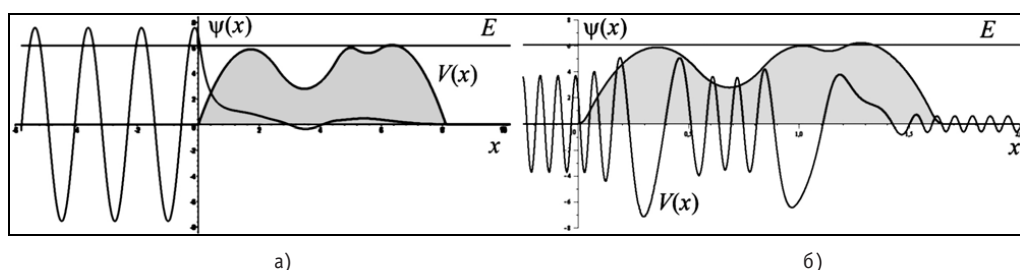


Рис. 5. Визуализация результатов, полученных в рамках моделей IV и V (а – потенциал, энергия частицы и волновая функция для двух значений энергии частицы в рамках модели IV, б – потенциал, энергия частицы и волновая функция для двух значений энергии частицы в рамках модели V)

данными для основных параметров барьеров, приведенными в табл. 2.

Вычисления коэффициента прохождения в рамках данной модели (для несимметричного барьера А) дают результаты для его зависимости от энергии частиц, представленные на рис. 6 и табл. 3. Как видно из приведенных данных в области энергии $2 \text{ МэВ} < E < 5.5 \text{ МэВ}$ имеются четыре резонанса, характеристики которых приведены в табл. 4.

При изменении параметров потенциала в рамках модели, при которых на 0.5 МэВ увеличивается значения V_{01} барьера и меняются кривизны второй и третьей парабол (табл. 1 – переход к потенциалу Б), зависимость коэффициента прохождения от энергии меняется; количество резонансов уменьшается до трех и меняются их свойства (рис. 7а и табл. 4) – положения и соответствующие значения коэффициента прохождения.

Таблица 2

Параметры барьеров в модели III (на примере ядра с $A = 240$)

Параметры, МэВ	Барьер А	Барьер Б	Барьер В	Барьер Г	Барьеры Д ₁ и Д ₂		Барьер Е ₁ и Е ₂	
V_{01}	5.50	6.00	6.00	6.00	5.50		6.00	
V_{02}	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00		2.00	
V_{03}	5.00	5.00	6.00	6.00	5.00		6.00	
$\nabla \cdot \omega_1$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.5	2.0	3.0
$\nabla \cdot \omega_2$	1.25	1.30	1.00	2.00	1.3	1.1	1.00	1.00
$\nabla \cdot \omega_3$	1.00	2.00	0.50	0.50	2.0	2.5	0.5	0.475
$\nabla \cdot \omega_4$	0.50	0.48	1.00	2.00	0.48	0.44	1.00	1.00
$\nabla \cdot \omega_5$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.5	2.0	3.0

Таблица 3

Подпороговые резонансы для двухгорбых барьеров распада (потенциал А)

Уровень	Энергия (МэВ)	Значение коэффициента прохождения
L_1	2.49192300	$0.1737289 \cdot 10^{-8}$
L_2	3.42961942	$0.7372895 \cdot 10^{-4}$
L_3	4.21537002	0.1108254
L_4	4.81088889	0.7823414

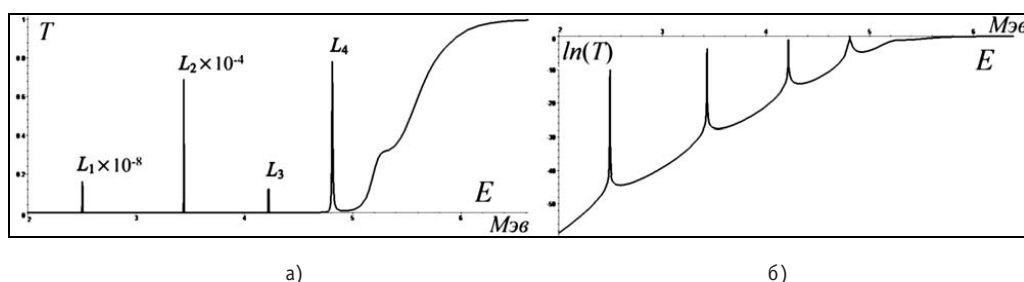


Рис. 6. Зависимость коэффициента прохождения от энергии частиц в обычном (а) и логарифмическом (б) масштабах и резонансы для потенциала А

Таблица 4

Подпороговые резонансы для двухгорбых барьеров распада (потенциал Б)

Уровень	Энергия (МэВ)	Значение коэффициента прохождения
L_1	2.8169734	$0.63018789 \cdot 10^{-5}$
L_2	4.0043707	0.11613461
L_3	4.7693107	$0.25511329 \cdot 10^{-1}$

Теперь рассмотрим симметричную реализацию потенциала – потенциал В. В этом случае (рис. 76) в области энергий $2 \text{ МэВ} < E < 6 \text{ МэВ}$ можно обнаружить наличие восьми квазистационарных уровней энергии, значения которых приведены в табл. 5.

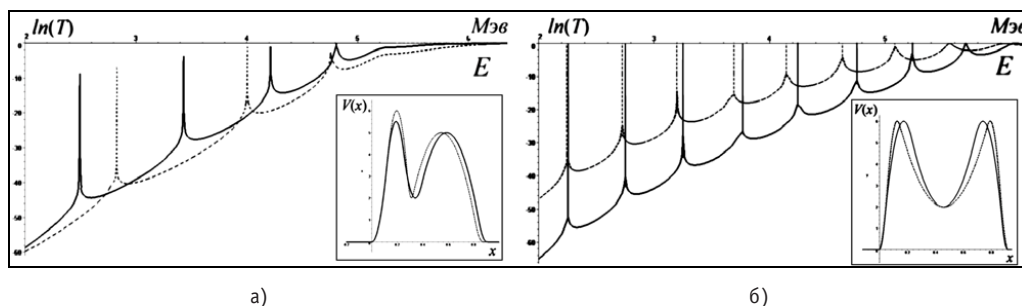


Рис. 7. Зависимости коэффициента прохождения от энергии частиц в логарифмическом масштабе (а – потенциал А – сплошная линия, потенциал Б – пунктирная линия; б – потенциал В – сплошная линия, потенциал Г – пунктирная линия)

Таблица 5

Уровни квазистационарных состояний для двухгорбых барьеров распада (потенциал В)

Уровень	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8
Энергия (МэВ)	2.249999	2.750000	3.249991	3.749916	4.249419	4.746863	5.235911	5.697212

При изменении параметров симметричного барьера, связанных с изменениями кривизны второй и четвертой парабол (табл. 2 – переход к потенциалу Г), количество квазистационарных состояний остается прежним, однако изменяются значения их энергий (рис. 10б).

Исследуем также влияние кривизны барьера в области гладких переходов к нулевому значению в точках $x_1 = 0$ и $x_5 = a_5$. Как видно из рис. 8, небольшие изменения кривизны (несимметричные потенциалы D_1 и D_2 и симметричные потенциалы E_1 и E_2 – табл.2) приводят к довольно существенным смещению уровней и изменениям значений коэффициента прохождения. Эти данные (а также приведенные выше результаты) означают «высокую чувствительность» результатов к форме и значениям параметров потенциала.

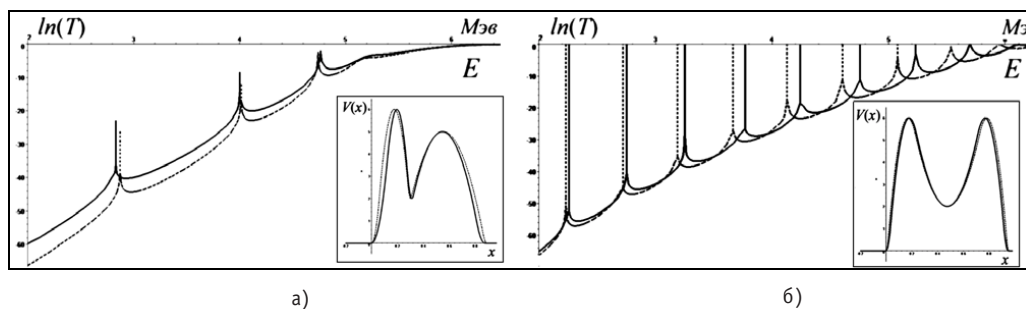


Рис. 8. Зависимости коэффициента прохождения от энергии частиц в логарифмическом масштабе (а – потенциал D_1 – сплошная линия, потенциал D_2 – пунктирная линия; б – потенциал E_1 – сплошная линия, потенциал E_2 – пунктирная линия)

Сравнивая полученные в рамках модели III результаты с данными, приведенными в [11], отметим:

1) для потенциала А количество резонансов, как и в [11], равно четырем; при этом энергии их практически совпадают; почти совпадают значения коэффициентов прохождения для третьего и четвертого резонансов, а значения первого и второго резонансов отличаются почти на порядок;

2) для потенциала Б количество резонансов, как и в [11], равно трем;

3) для симметричного потенциала В количество квазистационарных состояний, как и в [11], равно восьми.

Наличие некоторых отличий в результатах с указанной работой можно объяснить другой методикой расчета коэффициента прохождения, а также более сложной моделью, предполагающей использование пяти гладко сшитых парабол для потенциала, а не трех как в [11]. Заметим, что аналитические решения систем уравнений для коэффициентов A_i и B_i и формулы для коэффициента прохождения удается получить средствами MAPLE (для всех моделей); при этом выражения являются очень громоздкими, и нет возможности привести их полностью в обычной «печатной форме». Однако одним из преимуществ прикладных пакетов является возможность аналитических преобразований и манипуляций с громоздкими выражениями (причем как в явной, так и неявной формах).

Этапы алгоритмического решения задачи (все или некоторые: «сшиванием» потенциальных и волновых функций, решения уравнений Шредингера, визуализации и определения параметров) могут быть реализованы в пакетах MATHCAD и MATHEMATICA (в зависимости от сложности модели и возможностей пакетов).

Таким образом, в работе сформулированы пять моделей, конструирующие двух- и трехгорбые потенциалы тяжелых элементов; разработан комплекс программ для решения соответствующих уравнений Шредингера и вычисления коэффициента прохождения с применением функциональных алгоритмов в среде прикладного математического пакета MAPLE; получены точные решения для волновых функций и вычислены коэффициенты прохождения в рамках трех моделей. С помощью комплекса программ проведены исследования результатов, полученных в рамках сформулированных моделей для потенциалов, включающее компьютерную визуализацию волновых функций и функциональных зависимостей коэффициентов прохождения, и численный расчет резонансных уровней и энергий квазистационарных состояний для некоторых реализаций потенциалов; проведено исследование моделей потенциалов в рамках задачи рассеяния с целью выявления особенностей их использования и влияния разных реализаций потенциалов на конечный результат.

Автор выражает благодарность к.ф.-м.н. Ф.И. Карманову за обсуждения и полезные замечания.

Литература

1. *Strutinsky V.M.* // Nucl. Phys. – A95. – 1967. – P.420.
2. *Strutinsky V.M.* // Nucl. Phys. – A122. – 1968. – P.1.
3. *Bjornholm B., Strutinsky V.M.* // Nucl. Phys. – 1969. – A136. – P. 1.
4. *Howard W.M., Voller P.* At. Nucl. Data Tables. 25, 1908. – P.219.
5. *Lavin L., Delgado A., Capote R.* Improvements of the pairing correction for barrier code: ground state and saddle point deformation of the thorium isotopes. Nuclear structure // Proc. of the Conf.: Bologna 2000. Structure of the nucleus at the dawn of the century. World Sc. 2001. – P. 249-252.
6. *Ogloblin A.A., Artemov K.P., Glukhov Yu.A., Demyanova A.S., Paramonov V.V., Rozkov M.V., Rudakov V.P., Goncharov S.A.* Study of cluster emission barrier in $^{12}\text{C} + ^{205}\text{Pb}$ elastic scattering and possible observation of quasimolecular configuration. Nucleus-Nucleus collisions // Proc. of the Conf.: Bologna 2000. Structure of the nucleus at the dawn of the century. World Sc. 2001. – P. 409-412.
7. *Balantekin A.B., Takigawa N.* Quantum tunneling in nuclear fusion // Rev. Mod. Phys. – 1998. – V. 70. – № 1. – P. 77-100.
8. *Desmarais D., Duggan J. L.* The study of alpha-particle decay schemes of heavy nuclei // Amer. J. of Physics. – 1990. – V. 58. – Is. 11. – P. 1079-1085.
9. *Ignatyuk A. V., Rabotnov N. S., Smirenkin G. N.* Phys. Letters 29B, 1969, P. 209.

10. *Gai E. V. et al.* in Proceedings of the Second Symposium on the Physics and Chemistry of Fission, Vienna, Austria, 1969. – P. 337.
11. *Cramer J.D., Nix J.R.* Exact Calculation of the Penetrability Through Two-Peaked Fission Barriers // *Physical Review C*. – 1970. – V. 2. – № 3. – P. 1048-1057.
12. *James G.D.* Exact calculation of the penetrability through triple hump fission barrier // *Comp. Phys. Comm.* 40. 1986. – P. 375-378.
13. *Соколов А.А., Тернов И.М., Жуковский В.Ч.* Квантовая механика. – М.: Наука, 1979. – 528 с.
14. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика (в 10 т). Т. III. Квантовая механика (нерелятивистская теория). – М.: Физматлит, 2004. – 800 с.
15. *Флюгге З.* Задачи по квантовой механике (в 2 т). Т. I. – М.: Мир, 1974. – 344 с.
16. Справочник по специальным функциям / *Под. ред. М. Абрамовиц, И. Стиган.* – М.: Наука, 1979. – 832 с.

Поступила в редакцию 14.05.2007

code that is a model of degradation of a water-cooled reactor fuel rod under severe accidents.

УДК 621.039.5+519.85

Monte Carlo Precise Solution of Electron Transport Problem \ P.A. Androsenko, V.I. Belousov, A.G. Tsarina; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 6 pages, 2 illustrations. – References – 8 titles.

The approach of the work is to consider questions of the semi-analytic Monte Carlo method application for the problems decision of charged particles deep transmission, and also albedo, in conditions of barrier geometry. Estimation recurrent formulas for building of the sampling process without simulating of the particles free path length are deduced that allow the researcher to solve problems of deep penetration by simulating of electrons transport with the individual collisions technique successfully. The results of calculations from new BRAND version code that based on developed algorithms are given.

УДК 621.039.5+519.85

Monte Carlo Simulation of Ionizing Radiation Influence on Chemical Composition of Human Tissues \ P.A. Androsenko, V.I. Belousov, A.G. Tsarina; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 5 pages, 1 table, 1 illustration. – References – 4 titles.

The description and justification of the algorithm for modeling of radiation influence on tissue cells structure is developed on the basis of a statistical testing method. The main researched parameter is a dynamics of the concentration changes of free radicals and substances that are structural elements of cells. The received results agree well with theoretical and experimental data.

УДК 621.362

Universal mathematical model of electricity generation channel for heat, electrical and physical characteristics calculation \ D.G. Lazarenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 12 pages, 2 illustrations. – References – 16 titles.

Mathematical model of cylindrical geometry electricity generation channel for termionic reactor-converter for heat, electrical and physical characteristics calculation is considered. Proposed calculation method is suitable for multivariate calculations including optimization of output characteristics of electricity generation channels.

УДК 621.039.58

Mathematical Model of the Automated Technological Complex «Protection Object - Safety System» Function Process with Renewable Unit and Recurrent Control of Safety System \ A.I. Pereguda, D.A. Timashov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 9 pages, 2 illustrations. – References – 9 titles.

In the paper mathematical model of the automated technological complex «protection object - safety system» function process is proposed, in which system of scheduled recovery procedures is considered. The aim of this system is to provide safety operation of protection object. Cascade of integral equations was obtained and solved to calculate propability of complex crash on time interval $[0, t]$.

УДК 621.534: 519.7

Scattering Problem for Model Potential of Fission for Heavy Nucleus and Program Systems in Applied Mathematical Programs \ A.V. Tikhonenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 10 pages, 5 tables, 8 illustrations. – References – 16 titles.

Models of two- and tree-peaked fission barriers for heavy nucleus are formulated and program systems are developed in order to obtain exact solutions for wave functions, calculate transmission

coefficient, visualize results and define physical parameters with functional algorithms in MAPLE.

УДК 621.039.51

Uncertainties Estimation Reducing when Interval Analysis Method Is Used for Isotope Kinetics Problem \ D.V. Hitrick, V.V. Kolesov, D.A. Kamaev, V.F. Ukraintsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 7 pages, 6 tables. – References – 2 titles.

We suggest several ways of uncertainties estimation reducing when interval analysis is used for isotope kinetics problem. We also compare our results with linear perturbation theory (sensitivity analysis). It was found that for certain cases linear perturbation theory gives us essentially underestimated values of nuclide concentrations uncertainties.

УДК 539.1

Modeling of the Interaction Dynamics for the Nuclear Reaction with Charged Particles in the Final State \ V.L. Shablov, I.A. Tyras; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 5 pages, 3 illustrations. – References – 11 titles.

The method previously developed for the description of the post-collision Coulomb interaction in the reaction final state is generalized to the case of the resonance near threshold formation. Modeling of the Coulomb interaction has shown a good agreement with the experimental data for the reaction $d(^7\text{Li}, \alpha)\alpha n$ with $E_d = 6.8$ MeV. In this case, the resonance of ^5He ($E^* = 16.76$ MeV) was created.

УДК 621.039.51

The Classification of the Bifurcation Borders in the Point Model of the Xenon Oscillations \ N.A. Yakushkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 8 pages, 1 table, 2 illustrations. – References – 9 titles.

The present work deals with bifurcation borders in the point model of xenon oscillations. The general goal of the undertaken research is to determine safe and unsafe bifurcation borders. Such classification allows determining the range of a nuclear reactor control parameters, within which the reactor remains controllable. It should be mentioned, that xenon oscillations in nuclear reactors are so complex and diverse, that they cannot be correctly described in the point model. However, the fact that the method of bifurcation borders classification based on finding the multidimensional Schwartz derivative was successfully applied to the point model gives hope, that it can be also applied to more complex and thus more adequate xenon oscillations models.