

Вычислительные ограничения программы ORIGEN2 в задачах нуклидной кинетики

Е.Ф.Митенкова, Е.В.Соловьева

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
115191, Москва, ул. Б. Тульская, 52
тел.: (495) 955-22-02, факс: (495) 955-20-29, эл. почта: mit@ibrae.ac.ru

Оглавление

Оглавление.....	3
Введение	3
1 Краткая информация об используемых расчетных программах.....	5
2 Вычислительные особенности программы ORIGEN2 для решения задач нуклидной кинетики на полном базисе элементов выхода продуктов деления.....	6
2.1 Примеры несохранения исходных значений массы облучаемых композиций	6
2.2 Влияние параметра $Nstep$ на вычисление удельных концентраций нуклидов при использовании полной матрицы элементов выхода продуктов деления.....	7
2.2.1 Облучаемые композиции без актинидов	7
2.2.2 Анализ особенностей накопления нуклидов в облучаемых композициях без актинидов при разных временах облучения.....	13
2.2.3 Облучаемые уран-плутониевые композиции.....	14
2.2.4 Демонстрация различий накопления нуклидов в уран-плутониевых композициях при временах облучения до 100 сут	17
2.2.5 Анализ особенностей вычисляемых удельных концентраций нуклидов в облученной уран-плутониевой композиции для $T_{обл} = 1000$ сут	22
2.3 Вычисление «примесных» элементов в задачах нуклидной кинетики	24
3 Сравнительные расчеты по программам ORIGEN2, MZK и MATLAB	25
Заключение	30
Литература.....	31

Введение

К настоящему времени разработано достаточно много программ для решения задач нуклидной кинетики. Все эти программы ориентированы на решение определенного класса задач и реализованы с разными допущениями и ограничениями, которые, как показывает практика, не всегда принимаются во внимание при оценке полученных результатов с точки зрения их достоверности. Вычисление в реакторных системах интегральных значений, таких как эффективный коэффициент размножения нейтронов, остаточное тепловыделение, расчет энергораспределения осуществляется многими программами достаточно надежно и с приемлемой точностью. В полной мере это относится и к расчету накопления отдельных значимых нуклидов-мониторов. В программах для решения задач на выгорание к наиболее частым ограничениям можно отнести исключение из общего рассмотрения короткоживущих нуклидов, вычисление которых осуществляется с помощью других программ, и использование библиотек ядерных данных с ограниченным числом нейтронных реакций в цепочках перехода для ограниченного числа нуклидов-продуктов деления (ПД). При этом пороговые значения периода полураспада, в соответствии с которыми нуклиды относят к короткоживущим элементам, могут заметно различаться в разных программах. Это касается также и списка нуклидов ПД с кумулятивными значениями выхода, которые используются в конкретной расчетной программе.

Одними из наиболее распространенных программ, используемых для решения задач нуклидной кинетики, на протяжении более 30-и лет остаются программы семейства ORIGEN. Программа ORIGEN2, не имеющая формальных ограничений на количество используемых элементов и цепочек перехода (определяют переходы нуклидов в результате нейтронных реакций (n, γ), ($n, 2n$), (n, f) и др.) является одной из наиболее востребованных. Изначально при создании в 70-ые годы программы ORIGEN2 предполагалось

существование некой согласованности между предоставляемыми методами вычислений и существующей на тот момент платформой ядерно-физических данных, включающей цепочки переходов, библиотеки выхода продуктов деления, библиотеки распада радиоактивных нуклидов, библиотеки малогрупповых констант [1]. Автоматическое расширение базы ядерных данных с целью проведения уточняющих расчетов по программе ORIGEN2 оказывается несостоятельным, при котором не обеспечиваются достоверные решения для всех элементов и, тем более, оказывается невозможным получение гарантированных погрешностей вычислений.

Основная цель представляемого материала – демонстрация особенностей и вычислительных ограничений программы ORIGEN2 (используется как ORIGIN), обуславливающих принципиальную невозможность позиционирования ORIGEN2 как универсальной программы для решения задач нуклидной кинетики на любой платформе ядерных данных и тем более ее использования в качестве реперной. В ряде задач некорректно вычисленные с помощью ORIGEN2 значения могут быть интерпретированы как точные с последующим использованием в качестве реперных, что способствует формированию неверных выводов и распространению недостоверных данных при сопоставлении их с результатами расчетов по другим программам.

Применение в программе ORIGEN2 для решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) 1-го порядка двух разных вычислительных методов – Гаусс-Зейделя и экспоненциального матричного метода [1] без четкой регламентации их применения на разных временных сетках накладывает определенные ограничения на использование этой программы. Для получения асимптотического решения в математике применяются разные методы вычисления матричной экспоненты

$e^{At} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(At)^k}{k!}$. Во многих работах, рассматривающих алгоритмы вычисления матричной экспоненты,

показана сильная зависимость поведения матричной экспоненты e^{At} от вида матрицы A и ее числа обусловленности [2, 3] (так называемая матричная проблема). Если A – нормальная матрица, то применяемые алгоритмы аппроксимации e^{At} гарантированно обеспечивают устойчивое решение с относительно малой погрешностью. Для матрицы, не являющейся нормальной, подобные выводы не верны – корректность и устойчивость аппроксимации e^{At} необходимо доказывать в каждом отдельном случае для каждой конкретной матрицы. В задачах нуклидной кинетики формируемая матрица A не является нормальной. При возмущении матрицы A динамика изменения e^{At} , представляемая в [2] как

$$\frac{\|e^{(A+E)t} - e^{At}\|_2}{\|e^{At}\|_2} \leq t \|E\|_2 M(t)^2 \exp(tM(t)\|E\|_2),$$

показывает явную зависимость от характеристики $M(t)$, которая для нормальных матриц $M(t) \equiv 1$, а для не нормальных матриц может принимать как угодно большие значения, внося неопределенность в представление e^{At} . Оценка чувствительности отображения $A \rightarrow e^{At}$ с использованием числа обусловленности $v(A, t)$ в виде

$$\frac{\|e^{(A+E)t} - e^{At}\|_2}{\|e^{At}\|_2} \approx v(A, t) \frac{\|E\|_2}{\|A\|_2}$$

служит подтверждением того, что при *Больших числах* обусловленности $v(A, t)$ малые изменения в A могут приводить к большим изменениям в e^{At} . При этом специалистами в области матричных вычислений указывается на отсутствие аксиоматик, позволяющих увязывать вид матриц с определением для них соответствующих *Больших чисел* обусловленности. Также для не нормальных матриц характерна высокая чувствительность собственных значений к возмущениям. При этом изменения собственных значений носят нелинейный и немонотонный характер, обуславливая тем самым непредсказуемую зависимость нормы матрицы $\|e^{At}\|_2$ от возмущений. Таким образом, поведение матричных экспонент оказывается весьма разнообразным с множеством специфических особенностей, обусловленных видом рассматриваемой матрицы A .

Современные требования к обеспечению безопасности разрабатываемых реакторов нового поколения с перспективными видами ядерного топлива и увеличенными уровнями выгорания инициируют совершенствование расчетной базы. Повышение надежности решения задач физики реакторов, связанных с анализом ядерно-радиационной безопасности, во многом зависит от точности решения задач нуклидной кинетики. Это подразумевает не только проведение уточняющих расчетов, к которым относятся, например, полномасштабные (потвэльные) расчеты выгорания, использующие, как правило, стандартные модели с ограниченной базой ядерных данных, но и разработку прецизионных методов решения задач нук-

лидной кинетики на основе современных библиотек ядерных данных с максимально полным использованием ядерно-физических данных [4, 5].

Прецизионные методы решения задач нуклидной кинетики должны, прежде всего, обеспечивать гарантированную точность вычисляемых значений удельных концентраций для всех элементов с обоснованием их устойчивости и надежности. Это особенно важно и принципиально необходимо в отсутствие точных аналитических решений и экспериментальных данных для разрабатываемых систем с новыми топливными композициями и увеличенным выгоранием. Тем более что перспектива получения экспериментальных данных для большей части вычисляемых ПД практически отсутствует.

Математическое моделирование процессов облучения традиционно описывается системой ОДУ (уравнение Бейтмана), размерность которой зависит от количества учитываемых элементов. Прецизионные расчеты, использующие расширенные модели независимых выходов ПД, цепочки переходов с учетом значимых нейтронных реакций, включая реакции с возбуждением типа (n, x^*) и процессы с короткоживущими и долгоживущими элементами, приводят к математическим проблемам решения жестких систем ОДУ большой размерности, к которым относятся задачи нуклидной кинетики реакторных систем. Так, при моделировании выгорания с использованием всех элементов выхода ПД соответствующая матрица системы ОДУ имеет размерность $\sim 2000 \times 2000$ и более. При этом матрица оказывается сильно разреженной с элементами, различающимися до 30-и порядков, что относит подобные системы ОДУ к супержестким системам.

Все трудности решения жестких (супержестких) систем ОДУ при увеличении размерности проявляются еще в большей степени, делая невозможным использование стандартных вычислительных методов для решения задач нуклидной кинетики на полной матрице элементов выхода ПД с гарантированной погрешностью расчета, и тем самым способствуя поиску новых подходов к решению подобных задач.

1 Краткая информация об используемых расчетных программах

Особенности накопления нуклидов в облучаемых топливных композициях и композициях без актиноидов при использовании максимального числа элементов выхода продуктов деления, представляемых в современных файлах ядерных данных, рассмотрены для времени облучения $T_{\text{обл}}$ – от 1 секунды до 1000 суток. Все расчетные библиотеки ядерных данных (транспортные, библиотеки выхода ПД и др.) сформированы на основе ENDF/B-VII.1 [6].

При задании времени облучения принимались во внимание следующие соображения. В полномасштабных расчетах выгорания с помощью кодов MCNP5–MONTEBURNS2.0–ORIGEN2 одним из базовых расчетных параметров является «шаг облучения», определяющий временной интервал, в соответствии с которым осуществляется пересчет одногрупповых сечений нейтронных реакций, используемых в цепочках перехода, что обусловлено изменяемым в процессе облучения нейтронным спектром. В реакторных расчетах с учетом мощности и продолжительности макрокампаний рассматриваемых реакторных систем «шаг облучения» составляет 1, 10, 40 и 80 (или 100) сут в зависимости от специфики решаемых задач [7, 8]. В задачах активационного анализа с учетом значимости короткоживущих элементов время облучения может составлять секунды. Особенности накопления нуклидов на основе ограниченного числа цепочек переходов с короткоживущими элементами ($T_{1/2} < 1$ с) рассмотрены для времени облучения от 1 до 8640 с (0,1 сут). В программе ORIGEN2 при формировании вычислительных сеток в соответствии с $T_{\text{обл}}$ используется параметр $Nstep$. Расчеты выполнены при $Nstep=100, 1000, 10000, 50000, 100000$, которые позиционируются в дальнейшем как базовые значения (из-за ограничений синтаксиса в формате представления чисел в ORIGEN2 максимальное значение $Nstep=99990$).

Программа MZK, предназначенная для решения жестких систем ОДУ, базируется на использовании сверхточных программ-решателей библиотеки SADEL [9, 10], разработанной специалистами МГТУ им. Н.Э. Баумана, которая изначально была ориентирована на решение задач механики и систем управления. В программе реализованы AL-устойчивые методы с переменным шагом интегрирования: неявный метод первого порядка точности ($m1$); неявный метод второго порядка точности ($m2$); неявный метод Рунге-Кутты четвертого порядка точности ($m3$). Программа MZK адаптирована для решения задач нуклидной кинетики на полной матрице элементов выхода ПД [11]. Расчеты по MZK выполнены в основном методом $m2$ с точностью $\varepsilon=10^{-3}$ и $\varepsilon=10^{-4}$, который авторами позиционируется как оптимальный для практических расчетов [10]. Отдельные расчеты проведены методом $m3$ с увеличенной точностью $\varepsilon=10^{-6}$.

С целью понимания корректности (или некорректности) расчетов по MZK проведены поверочные расчеты с помощью стандартного пакета MATLAB. При этом используются многошаговые решатели ode15i и ode15s, основанные на переменном шаге интегрирования и формулах обратного дифференцирования [11, 12]. Для решения жестких систем в ode15s применяется метод Гира [13]. Важно отметить, что MATLAB для жестких систем не гарантирует получение решения с заданной точностью.

2 Вычислительные особенности программы ORIGEN2 для решения задач нуклидной кинетики на полном базисе элементов выхода продуктов деления

2.1 Примеры несохранения исходных значений массы облучаемых композиций

В качестве примера анализируется вычисляемая масса композиции, облучаемая постоянным нейтронным потоком $F_n = 2,72 \cdot 10^{15} \text{ н}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ в течение $T_{\text{обл}} = 10$ сут, где в качестве исходного облучаемого элемента выбирается один из изотопов цепочки переходов:

^{137}Sn (0,19 с) \Rightarrow ^{137}Sb (0,492 с) \Rightarrow ^{137}Te (2,5 с) \Rightarrow ^{137}I (24,6 с) \Rightarrow ^{137}Xe (230 с) \Rightarrow ^{137}Cs ($9,5 \cdot 10^8$ с) \Rightarrow ^{137}Ba (стабильный).

Результаты расчетов для разных начальных элементов – ^{137}Sn , ^{137}Te , ^{137}I и ^{137}Xe массой 137 г, выполненные по программе ORIGEN2 при $Nstep = 100$, приведены в сравнении с результатами, полученными по программе MZK [14].

Таблица 1. Некорректно вычисляемая в ORIGEN2 масса облученной композиции при разных начальных элементах облучения

$T_{\text{обл}}$	ORIGEN2				MZK
	Начальный элемент облучения				
	^{137}Sn	^{137}Te	^{137}I	^{137}Xe	^{137}Te
1 с	136,109	136,960	136,997	137	137,00003562
10 с	136,109	136,960	136,982	137	137,00002082
20 с	136,104	136,946	136,970	137	137,00002836
100 с	136,090	136,905	136,932	137	137,00004705
0,01 сут	167,863	136,901	136,929	137	137,00005193
0,1 сут	146,546	152,049	136,928	136,999	137,00004973
1 сут	139,670	153,139	152,104	136,999	137,00004918
10 сут	136,102	136,899	136,926	136,996	137,00004806

Анализ показывает сильную зависимость полученных значений от выбора начального элемента облучения. При начальной массе в 137 г в расчетах по ORIGEN2 на разные моменты времени облучения вычисляемые значения массы полученной композиции оказываются в диапазоне от 136 до 168 г. Так, при начальном элементе ^{137}Te для $T_{\text{обл}} = 1$ сут значение массы, вычисленное по программе ORIGEN2, составляет более 153 г. При выборе в качестве начального облучаемого элемента ^{137}Sn вообще наблюдается весьма пестрая картина относительно полученных значений массы в процессе облучения до $T_{\text{обл}} = 10$ сут, которое характеризуется изменением массы от ~ 136 г для $T_{\text{обл}} \leq 100$ с до ~ 168 г для $T_{\text{обл}} = 0,01$ сут и последующим спадом до 136 г для $T_{\text{обл}} = 10$ сут. Важно отметить, что расхождения могут быть совсем другими при анализе результатов, полученных при других значениях $Nstep$. Автоматическое увеличение $Nstep$ может привести к большим расхождениям полученных значений по сравнению с начальным, например, для $T_{\text{обл}} = 1$ сут с начальным элементом облучения ^{137}Sn при $Nstep = 40000$ вычисленное значение массы составляет **191,71 г**.

При этом расчеты по программе MZK демонстрируют устойчивое сохранение значения массы с точностью до 5-го знака, и это при любом начальном облучаемом элементе рассматриваемой цепочки переходов.

Таким образом, представленные примеры с некорректно вычисляемыми значениями массы в цепочках переходов с короткоживущими элементами [14] позволяют констатировать существование проблемы в расчетах по программе ORIGEN2.

2.2 Влияние параметра $Nstep$ на вычисление удельных концентраций нуклидов при использовании полной матрицы элементов выхода продуктов деления

2.2.1 Облучаемые композиции без актинидов

Зависимость рассчитываемых удельных концентраций нуклидов от параметра $Nstep$ в расчетах по программе ORIGEN2 на полной матрице элементов выхода ПД рассмотрена на примере облучения нейтронным потоком $F_n = 1,14 \cdot 10^{15} \text{ н}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ композиции из четырех элементов – ^{131}In , ^{132}In , ^{133}In , ^{131}Sm (In-Sm) с одинаковой массовой долей (0.25). В таблицах 2–4 приведены удельные концентрации отдельных нуклидов для $T_{\text{обл}} = 1, 10$ и 100 сут. Формат задания нуклидов определен в виде ZAAA, где Z – заряд и AAA – масса нуклида, для отдельных нуклидов цветом выделены области с большими значениями при соответствующих значениях $Nstep$.

Таблица 2. Сравнительные удельные концентрации нуклидов облученной In-Sm композиции для $T_{\text{обл}} = 1$ сут

Нуклид	$Nstep$			
	100	1000	10000	100000
ZAAA				
1001	$1,7368 \cdot 10^{-8}$	$1,2578 \cdot 10^{-8}$	$1,0655 \cdot 10^{-8}$	$1,0657 \cdot 10^{-8}$
1002	$7,0697 \cdot 10^{-17}$	$5,1170 \cdot 10^{-17}$	$4,3341 \cdot 10^{-17}$	$4,3343 \cdot 10^{-17}$
2004	$3,4762 \cdot 10^{-9}$	$2,5200 \cdot 10^{-9}$	$2,1369 \cdot 10^{-9}$	$2,1371 \cdot 10^{-9}$
50125	$8,9430 \cdot 10^{-23}$	$6,8373 \cdot 10^{-23}$	$<10^{-25}$	$<10^{-25}$
50126	$7,4353 \cdot 10^{-22}$	$7,3571 \cdot 10^{-22}$	$2,0588 \cdot 10^{-22}$	$<10^{-25}$
50128	$2,3947 \cdot 10^{-21}$	$2,3392 \cdot 10^{-21}$	$2,3322 \cdot 10^{-21}$	$2,3259 \cdot 10^{-21}$
50129	$5,8066 \cdot 10^{-14}$	$4,4406 \cdot 10^{-14}$	$4,4406 \cdot 10^{-14}$	$4,4201 \cdot 10^{-14}$
50130	$<10^{-25}$	$1,5346 \cdot 10^{-25}$	$1,6238 \cdot 10^{-24}$	$1,6994 \cdot 10^{-23}$
51126	$8,3946 \cdot 10^{-23}$	$5,7074 \cdot 10^{-23}$	$<10^{-25}$	$<10^{-25}$
51129	$2,0658 \cdot 10^{-12}$	$1,5797 \cdot 10^{-12}$	$1,5797 \cdot 10^{-12}$	$1,5724 \cdot 10^{-12}$
51131	$6,7680 \cdot 10^{-20}$	$6,7978 \cdot 10^{-20}$	$6,8001 \cdot 10^{-20}$	$6,7848 \cdot 10^{-20}$
51132	$9,3049 \cdot 10^{-15}$	$7,1159 \cdot 10^{-15}$	$7,1159 \cdot 10^{-15}$	$7,0831 \cdot 10^{-15}$
51133	$<10^{-25}$	$2,1529 \cdot 10^{-25}$	$2,3977 \cdot 10^{-24}$	$4,5628 \cdot 10^{-23}$
52125	$3,4150 \cdot 10^{-20}$	$2,4681 \cdot 10^{-20}$	$2,0896 \cdot 10^{-20}$	$1,9819 \cdot 10^{-20}$
52126	$7,9288 \cdot 10^{-22}$	$7,3786 \cdot 10^{-22}$	$8,2083 \cdot 10^{-23}$	$<10^{-25}$
52127	$5,1797 \cdot 10^{-15}$	$5,1797 \cdot 10^{-15}$	$5,1797 \cdot 10^{-15}$	$5,1655 \cdot 10^{-15}$
52127 ^m	$2,8296 \cdot 10^{-20}$	$2,7114 \cdot 10^{-20}$	$2,7084 \cdot 10^{-20}$	$2,5956 \cdot 10^{-20}$
52128	$6,7050 \cdot 10^{-12}$	$6,4369 \cdot 10^{-12}$	$6,4276 \cdot 10^{-12}$	$6,3989 \cdot 10^{-12}$
52129	$5,5374 \cdot 10^{-12}$	$5,4036 \cdot 10^{-12}$	$5,4035 \cdot 10^{-12}$	$5,3871 \cdot 10^{-12}$
52131	$3,3985 \cdot 10^{-10}$	$2,8146 \cdot 10^{-10}$	$2,8146 \cdot 10^{-10}$	$2,8032 \cdot 10^{-10}$
52131 ^m	$9,3527 \cdot 10^{-9}$	$7,2275 \cdot 10^{-9}$	$7,2275 \cdot 10^{-9}$	$7,1944 \cdot 10^{-9}$
52132	$4,7481 \cdot 10^{-1}$	$3,6311 \cdot 10^{-1}$	$3,6311 \cdot 10^{-1}$	$3,6144 \cdot 10^{-1}$
52133	$2,7820 \cdot 10^{-10}$	$2,1276 \cdot 10^{-10}$	$2,1276 \cdot 10^{-10}$	$2,1178 \cdot 10^{-10}$
52133 ^m	$1,8213 \cdot 10^{-10}$	$1,3928 \cdot 10^{-10}$	$1,3928 \cdot 10^{-10}$	$1,3866 \cdot 10^{-10}$
53126	$1,8436 \cdot 10^{-22}$	$1,7633 \cdot 10^{-22}$	$<10^{-25}$	$<10^{-25}$
53128	$4,9781 \cdot 10^{-14}$	$3,6038 \cdot 10^{-14}$	$3,0515 \cdot 10^{-14}$	$3,0521 \cdot 10^{-14}$
53129	$6,9122 \cdot 10^{-11}$	$6,7716 \cdot 10^{-11}$	$6,7715 \cdot 10^{-11}$	$6,7503 \cdot 10^{-11}$

53130	$2,7923 \cdot 10^{-9}$	$2,6921 \cdot 10^{-9}$	$2,6921 \cdot 10^{-9}$	$2,6811 \cdot 10^{-9}$
53131	$2,5028 \cdot 10^{-1}$	$2,4142 \cdot 10^{-1}$	$2,4142 \cdot 10^{-1}$	$2,4056 \cdot 10^{-1}$
53132	$1,4344 \cdot 10^{-2}$	$1,0970 \cdot 10^{-2}$	$1,0970 \cdot 10^{-2}$	$1,0919 \cdot 10^{-2}$
53133	$1,7245 \cdot 10^{-2}$	$1,7245 \cdot 10^{-2}$	$1,9224 \cdot 10^{-2}$	$1,7052 \cdot 10^{-2}$
53134	$7,1399 \cdot 10^{-9}$	$7,1399 \cdot 10^{-9}$	$7,9591 \cdot 10^{-9}$	$7,0601 \cdot 10^{-9}$
53134 ^m	$7,8767 \cdot 10^{-12}$	$7,8767 \cdot 10^{-12}$	$8,7803 \cdot 10^{-12}$	$7,7885 \cdot 10^{-12}$
54127	$3,5273 \cdot 10^{-17}$	$2,5109 \cdot 10^{-17}$	$2,1259 \cdot 10^{-17}$	$2,1260 \cdot 10^{-17}$
54127 ^m	$1,1996 \cdot 10^{-20}$	$8,6722 \cdot 10^{-21}$	$7,3432 \cdot 10^{-21}$	$7,3427 \cdot 10^{-21}$
54128	$3,4543 \cdot 10^{-9}$	$2,5006 \cdot 10^{-9}$	$2,1174 \cdot 10^{-9}$	$2,1180 \cdot 10^{-9}$
54129	$1,3889 \cdot 10^{-14}$	$1,0052 \cdot 10^{-14}$	$8,5129 \cdot 10^{-15}$	$8,5142 \cdot 10^{-15}$
54129 ^m	$1,7143 \cdot 10^{-15}$	$1,2444 \cdot 10^{-15}$	$1,0561 \cdot 10^{-15}$	$1,0562 \cdot 10^{-15}$
54130	$5,5678 \cdot 10^{-9}$	$5,3185 \cdot 10^{-9}$	$5,2989 \cdot 10^{-9}$	$5,2752 \cdot 10^{-9}$
54131	$2,2108 \cdot 10^{-2}$	$2,1133 \cdot 10^{-2}$	$2,1054 \cdot 10^{-2}$	$2,0964 \cdot 10^{-2}$
54131 ^m	$7,4014 \cdot 10^{-10}$	$5,6512 \cdot 10^{-10}$	$5,6513 \cdot 10^{-10}$	$5,6243 \cdot 10^{-10}$
54132	$9,7869 \cdot 10^{-2}$	$7,4782 \cdot 10^{-2}$	$7,4782 \cdot 10^{-2}$	$7,4423 \cdot 10^{-2}$
54133	$1,9218 \cdot 10^{-2}$	$1,9218 \cdot 10^{-2}$	$2,1422 \cdot 10^{-2}$	$1,9002 \cdot 10^{-2}$
54133 ^m	$2,0858 \cdot 10^{-8}$	$1,5927 \cdot 10^{-8}$	$1,5927 \cdot 10^{-8}$	$1,5851 \cdot 10^{-8}$
54134	$2,2340 \cdot 10^{-7}$	$2,2340 \cdot 10^{-7}$	$2,4903 \cdot 10^{-7}$	$2,2088 \cdot 10^{-7}$
54134 ^m	$1,2943 \cdot 10^{-14}$	$1,2943 \cdot 10^{-14}$	$1,4428 \cdot 10^{-14}$	$1,2798 \cdot 10^{-14}$
54135	$1,4833 \cdot 10^{-13}$	$1,4833 \cdot 10^{-13}$	$1,6534 \cdot 10^{-13}$	$1,4666 \cdot 10^{-13}$
54135 ^m	$1,7729 \cdot 10^{-16}$	$1,7729 \cdot 10^{-16}$	$1,9763 \cdot 10^{-16}$	$1,7529 \cdot 10^{-16}$
54136	$2,0864 \cdot 10^{-20}$	$2,0836 \cdot 10^{-20}$	$2,3219 \cdot 10^{-20}$	$1,9455 \cdot 10^{-20}$
55129	$1,5797 \cdot 10^{-17}$	$1,1428 \cdot 10^{-17}$	$9,6757 \cdot 10^{-18}$	$9,6767 \cdot 10^{-18}$
55130	$7,2128 \cdot 10^{-12}$	$5,2215 \cdot 10^{-12}$	$4,4213 \cdot 10^{-12}$	$4,4222 \cdot 10^{-12}$
55131	$2,0927 \cdot 10^{-2}$	$1,5150 \cdot 10^{-2}$	$1,2828 \cdot 10^{-2}$	$1,2833 \cdot 10^{-2}$
55132	$1,9811 \cdot 10^{-7}$	$1,4334 \cdot 10^{-7}$	$1,2136 \cdot 10^{-7}$	$1,2137 \cdot 10^{-7}$
55133	$1,4527 \cdot 10^{-3}$	$1,4527 \cdot 10^{-3}$	$1,6193 \cdot 10^{-3}$	$1,4363 \cdot 10^{-3}$
55134	$9,6570 \cdot 10^{-9}$	$9,6570 \cdot 10^{-9}$	$1,0764 \cdot 10^{-8}$	$9,5477 \cdot 10^{-9}$
55134 ^m	$3,0697 \cdot 10^{-10}$	$3,0697 \cdot 10^{-10}$	$3,4216 \cdot 10^{-10}$	$3,0350 \cdot 10^{-10}$
55135	$1,4430 \cdot 10^{-13}$	$1,4430 \cdot 10^{-13}$	$1,6084 \cdot 10^{-13}$	$1,4266 \cdot 10^{-13}$
55135 ^m	$3,2814 \cdot 10^{-17}$	$3,2814 \cdot 10^{-17}$	$3,6575 \cdot 10^{-17}$	$3,2442 \cdot 10^{-17}$
55136	$2,8307 \cdot 10^{-19}$	$2,8298 \cdot 10^{-19}$	$3,1504 \cdot 10^{-19}$	$2,7735 \cdot 10^{-19}$
55136 ^m	$6,7573 \cdot 10^{-24}$	$6,7044 \cdot 10^{-24}$	$7,2169 \cdot 10^{-24}$	$3,5001 \cdot 10^{-24}$
56129	$3,2079 \cdot 10^{-18}$	$2,3220 \cdot 10^{-18}$	$1,9661 \cdot 10^{-18}$	$1,9664 \cdot 10^{-18}$
56129 ^m	$2,7934 \cdot 10^{-18}$	$2,0220 \cdot 10^{-18}$	$1,7121 \cdot 10^{-18}$	$1,7124 \cdot 10^{-18}$
56130	$2,2366 \cdot 10^{-8}$	$1,6191 \cdot 10^{-8}$	$1,3710 \cdot 10^{-8}$	$1,3714 \cdot 10^{-8}$
56131	$3,8592 \cdot 10^{-1}$	$2,7955 \cdot 10^{-1}$	$2,3673 \cdot 10^{-1}$	$2,3701 \cdot 10^{-1}$
56131 ^m	$2,3981 \cdot 10^{-15}$	$1,7360 \cdot 10^{-15}$	$1,4700 \cdot 10^{-15}$	$1,4704 \cdot 10^{-15}$
56132	$3,9697 \cdot 10^{-6}$	$2,8738 \cdot 10^{-6}$	$2,4334 \cdot 10^{-6}$	$2,4338 \cdot 10^{-6}$
56133	$5,0800 \cdot 10^{-11}$	$3,6754 \cdot 10^{-11}$	$3,1118 \cdot 10^{-11}$	$3,1119 \cdot 10^{-11}$
56133 ^m	$4,3130 \cdot 10^{-12}$	$3,1206 \cdot 10^{-12}$	$2,6422 \cdot 10^{-12}$	$2,6422 \cdot 10^{-12}$
56134	$2,2726 \cdot 10^{-12}$	$2,2726 \cdot 10^{-12}$	$2,5330 \cdot 10^{-12}$	$2,2468 \cdot 10^{-12}$
56135	$2,5806 \cdot 10^{-18}$	$2,5805 \cdot 10^{-18}$	$2,8759 \cdot 10^{-18}$	$2,5505 \cdot 10^{-18}$

56135 ^m	$2,1592 \cdot 10^{-19}$	$2,1590 \cdot 10^{-19}$	$2,4057 \cdot 10^{-19}$	$2,1306 \cdot 10^{-19}$
56136	$5,4973 \cdot 10^{-21}$	$5,4156 \cdot 10^{-21}$	$5,6638 \cdot 10^{-21}$	$1,9405 \cdot 10^{-21}$
57131	$2,2666 \cdot 10^{-8}$	$1,6572 \cdot 10^{-8}$	$1,4055 \cdot 10^{-8}$	$1,4055 \cdot 10^{-8}$
58131	$<10^{-25}$	$1,9153 \cdot 10^{-24}$	$3,3102 \cdot 10^{-23}$	$4,7555 \cdot 10^{-22}$
59131	$<10^{-25}$	$1,5523 \cdot 10^{-25}$	$3,6203 \cdot 10^{-24}$	$5,8819 \cdot 10^{-23}$

Таблица 3. Сравнительные удельные концентрации нуклидов облученной In-Sm композиции для $T_{\text{обл}} = 10$ сут

Нуклид	<i>Nstep</i>			
	1000	10000	50000	100000
1001	$1,4612 \cdot 10^{-7}$	$1,0599 \cdot 10^{-7}$	$1,2797 \cdot 10^{-7}$	$8,9881 \cdot 10^{-8}$
1002	$6,8522 \cdot 10^{-15}$	$4,9680 \cdot 10^{-15}$	$5,9999 \cdot 10^{-15}$	$4,2112 \cdot 10^{-15}$
2004	$2,9064 \cdot 10^{-8}$	$2,1101 \cdot 10^{-8}$	$2,5458 \cdot 10^{-8}$	$1,7907 \cdot 10^{-8}$
50125	$2,3866 \cdot 10^{-20}$	$2,2481 \cdot 10^{-20}$	$2,2680 \cdot 10^{-20}$	$2,1690 \cdot 10^{-20}$
50128	$2,2533 \cdot 10^{-23}$	$2,6158 \cdot 10^{-23}$	$4,9738 \cdot 10^{-23}$	$7,9330 \cdot 10^{-23}$
50129	$8,5580 \cdot 10^{-15}$	$6,5448 \cdot 10^{-15}$	$6,5448 \cdot 10^{-15}$	$6,5448 \cdot 10^{-15}$
50130	$<10^{-25}$	$1,5346 \cdot 10^{-25}$	$8,0088 \cdot 10^{-25}$	$1,6158 \cdot 10^{-24}$
51125	$5,3792 \cdot 10^{-21}$	$5,0047 \cdot 10^{-21}$	$4,1898 \cdot 10^{-21}$	$2,3102 \cdot 10^{-21}$
51126	$6,3776 \cdot 10^{-21}$	$6,2820 \cdot 10^{-21}$	$5,4639 \cdot 10^{-21}$	$1,7640 \cdot 10^{-21}$
51126 ^m	$1,6947 \cdot 10^{-22}$	$1,6781 \cdot 10^{-22}$	$1,6013 \cdot 10^{-22}$	$1,5061 \cdot 10^{-22}$
51128 ^m	$1,6766 \cdot 10^{-20}$	$1,6766 \cdot 10^{-20}$	$1,6765 \cdot 10^{-20}$	$1,6761 \cdot 10^{-20}$
51129	$3,1302 \cdot 10^{-13}$	$2,3938 \cdot 10^{-13}$	$2,3938 \cdot 10^{-13}$	$2,3938 \cdot 10^{-13}$
51130	$3,1764 \cdot 10^{-15}$	$3,1764 \cdot 10^{-15}$	$3,1764 \cdot 10^{-15}$	$3,1764 \cdot 10^{-15}$
51131	$5,3649 \cdot 10^{-23}$	$5,1384 \cdot 10^{-23}$	$7,1522 \cdot 10^{-23}$	$9,4137 \cdot 10^{-23}$
51132	$1,3714 \cdot 10^{-15}$	$1,0488 \cdot 10^{-15}$	$1,0488 \cdot 10^{-15}$	$1,0488 \cdot 10^{-15}$
52124	$1,0130 \cdot 10^{-23}$	$<10^{-25}$	$<10^{-25}$	$<10^{-25}$
52125	$3,2903 \cdot 10^{-18}$	$2,3829 \cdot 10^{-18}$	$2,8804 \cdot 10^{-18}$	$2,0180 \cdot 10^{-18}$
52126	$1,4455 \cdot 10^{-19}$	$1,4340 \cdot 10^{-19}$	$1,3989 \cdot 10^{-19}$	$1,3432 \cdot 10^{-19}$
52127	$6,1395 \cdot 10^{-14}$	$6,1394 \cdot 10^{-14}$	$6,1392 \cdot 10^{-14}$	$6,1389 \cdot 10^{-14}$
52127 ^m	$8,7496 \cdot 10^{-18}$	$8,2473 \cdot 10^{-18}$	$8,3669 \cdot 10^{-18}$	$8,1599 \cdot 10^{-18}$
52128	$1,7802 \cdot 10^{-10}$	$1,6604 \cdot 10^{-10}$	$1,6959 \cdot 10^{-10}$	$1,6343 \cdot 10^{-10}$
52129	$5,8065 \cdot 10^{-12}$	$5,7718 \cdot 10^{-12}$	$5,7718 \cdot 10^{-12}$	$5,7717 \cdot 10^{-12}$
52131	$1,4202 \cdot 10^{-10}$	$1,3055 \cdot 10^{-10}$	$1,3055 \cdot 10^{-10}$	$1,3055 \cdot 10^{-10}$
52131 ^m	$5,9054 \cdot 10^{-9}$	$4,7221 \cdot 10^{-9}$	$4,7222 \cdot 10^{-9}$	$4,7222 \cdot 10^{-9}$
52132	$6,9979 \cdot 10^{-2}$	$5,3517 \cdot 10^{-2}$	$5,3517 \cdot 10^{-2}$	$5,3516 \cdot 10^{-2}$
52133	$4,1002 \cdot 10^{-11}$	$3,1356 \cdot 10^{-11}$	$3,1356 \cdot 10^{-11}$	$3,1356 \cdot 10^{-11}$
52133 ^m	$2,6842 \cdot 10^{-11}$	$2,0528 \cdot 10^{-11}$	$2,0528 \cdot 10^{-11}$	$2,0528 \cdot 10^{-11}$
53126	$5,2819 \cdot 10^{-19}$	$5,2809 \cdot 10^{-19}$	$5,2809 \cdot 10^{-19}$	$5,2795 \cdot 10^{-19}$
53128	$3,0377 \cdot 10^{-13}$	$2,2003 \cdot 10^{-13}$	$2,6594 \cdot 10^{-13}$	$1,8632 \cdot 10^{-13}$
53129	$8,2831 \cdot 10^{-10}$	$8,1775 \cdot 10^{-10}$	$8,1775 \cdot 10^{-10}$	$8,1774 \cdot 10^{-10}$
53130	$1,8445 \cdot 10^{-9}$	$1,7793 \cdot 10^{-9}$	$1,7793 \cdot 10^{-9}$	$1,7794 \cdot 10^{-9}$
53131	$1,1520 \cdot 10^{-1}$	$1,1112 \cdot 10^{-1}$	$1,1112 \cdot 10^{-1}$	$1,1112 \cdot 10^{-1}$
53132	$2,1161 \cdot 10^{-3}$	$1,6183 \cdot 10^{-3}$	$1,6183 \cdot 10^{-3}$	$1,6183 \cdot 10^{-3}$
53133	$1,2905 \cdot 10^{-5}$	$1,2904 \cdot 10^{-5}$	$1,2904 \cdot 10^{-5}$	$1,4384 \cdot 10^{-5}$

53134	$5,3430 \cdot 10^{-12}$	$5,3425 \cdot 10^{-12}$	$5,3423 \cdot 10^{-12}$	$5,9551 \cdot 10^{-12}$
53134 ^m	$5,8945 \cdot 10^{-15}$	$5,8938 \cdot 10^{-15}$	$5,8936 \cdot 10^{-15}$	$6,5697 \cdot 10^{-15}$
53135	$8,2119 \cdot 10^{-24}$	$<10^{-25}$	$<10^{-25}$	$<10^{-25}$
54127	$3,2033 \cdot 10^{-15}$	$2,2831 \cdot 10^{-15}$	$2,7596 \cdot 10^{-15}$	$1,9334 \cdot 10^{-15}$
54127 ^m	$1,0002 \cdot 10^{-19}$	$7,2427 \cdot 10^{-20}$	$8,7542 \cdot 10^{-20}$	$6,1333 \cdot 10^{-20}$
54128	$2,8801 \cdot 10^{-8}$	$2,0861 \cdot 10^{-8}$	$2,5214 \cdot 10^{-8}$	$1,7665 \cdot 10^{-8}$
54129	$1,3839 \cdot 10^{-12}$	$1,0048 \cdot 10^{-12}$	$1,2124 \cdot 10^{-12}$	$8,5248 \cdot 10^{-13}$
54129 ^m	$1,4004 \cdot 10^{-13}$	$1,0347 \cdot 10^{-13}$	$1,2335 \cdot 10^{-13}$	$8,8874 \cdot 10^{-14}$
54130	$3,6043 \cdot 10^{-7}$	$3,3125 \cdot 10^{-7}$	$3,4153 \cdot 10^{-7}$	$3,2369 \cdot 10^{-7}$
54131	$2,1192 \cdot 10^{-1}$	$1,9106 \cdot 10^{-1}$	$1,9945 \cdot 10^{-1}$	$1,8491 \cdot 10^{-1}$
54131 ^m	$4,6243 \cdot 10^{-8}$	$3,5357 \cdot 10^{-8}$	$3,5357 \cdot 10^{-8}$	$3,5357 \cdot 10^{-8}$
54132	$5,1493 \cdot 10^{-1}$	$3,9374 \cdot 10^{-1}$	$3,9374 \cdot 10^{-1}$	$3,9374 \cdot 10^{-1}$
54133	$1,2133 \cdot 10^{-2}$	$1,2131 \cdot 10^{-2}$	$1,2130 \cdot 10^{-2}$	$1,3521 \cdot 10^{-2}$
54133 ^m	$6,8617 \cdot 10^{-7}$	$5,2466 \cdot 10^{-7}$	$5,2466 \cdot 10^{-7}$	$5,2465 \cdot 10^{-7}$
54134	$9,9533 \cdot 10^{-7}$	$9,9523 \cdot 10^{-7}$	$9,9487 \cdot 10^{-7}$	$1,1084 \cdot 10^{-6}$
54134 ^m	$8,1719 \cdot 10^{-15}$	$8,1704 \cdot 10^{-15}$	$8,1700 \cdot 10^{-15}$	$9,1067 \cdot 10^{-15}$
54135	$1,1841 \cdot 10^{-12}$	$1,1839 \cdot 10^{-12}$	$1,1835 \cdot 10^{-12}$	$1,3186 \cdot 10^{-12}$
54135 ^m	$8,0037 \cdot 10^{-16}$	$8,0029 \cdot 10^{-16}$	$8,0000 \cdot 10^{-16}$	$8,9132 \cdot 10^{-16}$
54136	$2,7828 \cdot 10^{-18}$	$2,7825 \cdot 10^{-18}$	$2,7821 \cdot 10^{-18}$	$3,1003 \cdot 10^{-18}$
55129	$6,8530 \cdot 10^{-16}$	$4,9637 \cdot 10^{-16}$	$5,9995 \cdot 10^{-16}$	$4,2032 \cdot 10^{-16}$
55130	$4,4201 \cdot 10^{-11}$	$3,2016 \cdot 10^{-11}$	$3,8698 \cdot 10^{-11}$	$2,7112 \cdot 10^{-11}$
55131	$1,2457 \cdot 10^{-1}$	$9,0228 \cdot 10^{-2}$	$1,0906 \cdot 10^{-1}$	$7,6407 \cdot 10^{-2}$
55132	$1,1119 \cdot 10^{-5}$	$8,0542 \cdot 10^{-6}$	$9,7343 \cdot 10^{-6}$	$6,8215 \cdot 10^{-6}$
55133	$2,5781 \cdot 10^{-2}$	$2,5780 \cdot 10^{-2}$	$2,5779 \cdot 10^{-2}$	$2,8736 \cdot 10^{-2}$
55134	$2,6292 \cdot 10^{-6}$	$2,6291 \cdot 10^{-6}$	$2,6291 \cdot 10^{-6}$	$2,9307 \cdot 10^{-6}$
55134 ^m	$7,3487 \cdot 10^{-9}$	$7,3484 \cdot 10^{-9}$	$7,3481 \cdot 10^{-9}$	$8,1909 \cdot 10^{-9}$
55135	$1,7005 \cdot 10^{-10}$	$1,7005 \cdot 10^{-10}$	$1,7004 \cdot 10^{-10}$	$1,8955 \cdot 10^{-10}$
55135 ^m	$1,0258 \cdot 10^{-14}$	$1,0258 \cdot 10^{-14}$	$1,0258 \cdot 10^{-14}$	$1,1435 \cdot 10^{-14}$
55136	$3,1579 \cdot 10^{-15}$	$3,1570 \cdot 10^{-15}$	$3,1569 \cdot 10^{-15}$	$3,5190 \cdot 10^{-15}$
55136 ^m	$7,9635 \cdot 10^{-21}$	$7,9625 \cdot 10^{-21}$	$7,9623 \cdot 10^{-21}$	$8,8755 \cdot 10^{-21}$
55137	$5,9239 \cdot 10^{-20}$	$5,9175 \cdot 10^{-20}$	$5,8875 \cdot 10^{-20}$	$6,5202 \cdot 10^{-20}$
56129	$3,1112 \cdot 10^{-17}$	$2,2535 \cdot 10^{-17}$	$2,7237 \cdot 10^{-17}$	$1,9083 \cdot 10^{-17}$
56129 ^m	$2,6680 \cdot 10^{-17}$	$1,9325 \cdot 10^{-17}$	$2,3358 \cdot 10^{-17}$	$1,6364 \cdot 10^{-17}$
56130	$1,8619 \cdot 10^{-7}$	$1,3486 \cdot 10^{-7}$	$1,6300 \cdot 10^{-7}$	$1,1420 \cdot 10^{-7}$
56131	$2,2749 \cdot 10^{-1}$	$1,6479 \cdot 10^{-1}$	$1,9918 \cdot 10^{-1}$	$1,3955 \cdot 10^{-1}$
56131 ^m	$2,0256 \cdot 10^{-14}$	$1,4671 \cdot 10^{-14}$	$1,7733 \cdot 10^{-14}$	$1,2424 \cdot 10^{-14}$
56132	$3,3113 \cdot 10^{-5}$	$2,3984 \cdot 10^{-5}$	$2,8989 \cdot 10^{-5}$	$2,0310 \cdot 10^{-5}$
56133	$5,1431 \cdot 10^{-9}$	$3,7249 \cdot 10^{-9}$	$4,5023 \cdot 10^{-9}$	$3,1543 \cdot 10^{-9}$
56133 ^m	$1,6342 \cdot 10^{-10}$	$1,1836 \cdot 10^{-10}$	$1,4306 \cdot 10^{-10}$	$1,0023 \cdot 10^{-10}$
56134	$7,9208 \cdot 10^{-9}$	$7,9207 \cdot 10^{-9}$	$7,9205 \cdot 10^{-9}$	$8,8291 \cdot 10^{-9}$
56135	$1,1142 \cdot 10^{-13}$	$1,1142 \cdot 10^{-13}$	$1,1141 \cdot 10^{-13}$	$1,2420 \cdot 10^{-13}$
56135 ^m	$4,3914 \cdot 10^{-15}$	$4,3913 \cdot 10^{-15}$	$4,3912 \cdot 10^{-15}$	$4,8950 \cdot 10^{-15}$
56136	$3,7169 \cdot 10^{-16}$	$3,7059 \cdot 10^{-16}$	$3,7058 \cdot 10^{-16}$	$4,1309 \cdot 10^{-16}$

56137	$1,5685 \cdot 10^{-21}$	$1,4101 \cdot 10^{-21}$	$7,6869 \cdot 10^{-22}$	$<10^{-25}$
57131	$5,5001 \cdot 10^{-25}$	$1,7128 \cdot 10^{-23}$	$1,1267 \cdot 10^{-22}$	$2,5327 \cdot 10^{-22}$

Таблица 4. Сравнительные удельные концентрации нуклидов облученной In-Sm композиции для $T_{\text{обл}} = 100$ сут

Нуклид	<i>Nstep</i>				
	1000	5000	10000	50000	100000
1001	$2,7523 \cdot 10^{-7}$	$2,7958 \cdot 10^{-7}$	$3,5544 \cdot 10^{-7}$	$2,6049 \cdot 10^{-7}$	$2,6048 \cdot 10^{-7}$
1002	$1,9078 \cdot 10^{-13}$	$1,9351 \cdot 10^{-13}$	$2,4737 \cdot 10^{-13}$	$1,8039 \cdot 10^{-13}$	$1,8039 \cdot 10^{-13}$
1003	$3,3607 \cdot 10^{-21}$	$3,3845 \cdot 10^{-21}$	$4,2988 \cdot 10^{-21}$	$1,6978 \cdot 10^{-21}$	$<10^{-25}$
2004	$5,4776 \cdot 10^{-8}$	$5,5490 \cdot 10^{-8}$	$7,0647 \cdot 10^{-8}$	$5,1810 \cdot 10^{-8}$	$5,1809 \cdot 10^{-8}$
50125	$1,9149 \cdot 10^{-18}$	$1,9255 \cdot 10^{-18}$	$2,1763 \cdot 10^{-18}$	$1,8297 \cdot 10^{-18}$	$1,8296 \cdot 10^{-18}$
50127	$1,7721 \cdot 10^{-14}$	$1,7723 \cdot 10^{-14}$	$1,7014 \cdot 10^{-14}$	$1,7014 \cdot 10^{-14}$	$1,7014 \cdot 10^{-14}$
50128	$1,5001 \cdot 10^{-23}$	$1,5294 \cdot 10^{-23}$	$1,4981 \cdot 10^{-23}$	$1,7396 \cdot 10^{-23}$	$2,0345 \cdot 10^{-23}$
51125	$5,1420 \cdot 10^{-18}$	$5,1666 \cdot 10^{-18}$	$5,7591 \cdot 10^{-18}$	$4,9181 \cdot 10^{-18}$	$4,9181 \cdot 10^{-18}$
51126	$2,7781 \cdot 10^{-20}$	$2,7779 \cdot 10^{-20}$	$2,6674 \cdot 10^{-20}$	$2,5875 \cdot 10^{-20}$	$2,4844 \cdot 10^{-20}$
51126 ^m	$2,1335 \cdot 10^{-22}$	$2,1327 \cdot 10^{-22}$	$2,0467 \cdot 10^{-22}$	$2,0390 \cdot 10^{-22}$	$2,0285 \cdot 10^{-22}$
51129	$2,6046 \cdot 10^{-20}$	$2,6062 \cdot 10^{-20}$	$2,5428 \cdot 10^{-20}$	$2,5081 \cdot 10^{-20}$	$2,5093 \cdot 10^{-20}$
51130	$3,3079 \cdot 10^{-15}$	$3,3082 \cdot 10^{-15}$	$3,1760 \cdot 10^{-15}$	$3,1760 \cdot 10^{-15}$	$3,1760 \cdot 10^{-15}$
51131	$3,6410 \cdot 10^{-23}$	$3,6551 \cdot 10^{-23}$	$3,5195 \cdot 10^{-23}$	$3,6168 \cdot 10^{-23}$	$3,7269 \cdot 10^{-23}$
52124	$1,8787 \cdot 10^{-20}$	$1,8951 \cdot 10^{-20}$	$2,0954 \cdot 10^{-20}$	$1,7371 \cdot 10^{-20}$	$1,6176 \cdot 10^{-20}$
52125	$8,7455 \cdot 10^{-17}$	$8,8536 \cdot 10^{-17}$	$1,1402 \cdot 10^{-16}$	$8,2603 \cdot 10^{-17}$	$8,2593 \cdot 10^{-17}$
52126	$6,2350 \cdot 10^{-17}$	$6,2360 \cdot 10^{-17}$	$6,0090 \cdot 10^{-17}$	$5,9839 \cdot 10^{-17}$	$5,9839 \cdot 10^{-17}$
52127	$7,8973 \cdot 10^{-14}$	$7,8979 \cdot 10^{-14}$	$7,5835 \cdot 10^{-14}$	$7,5813 \cdot 10^{-14}$	$7,5805 \cdot 10^{-14}$
52127 ^m	$1,8147 \cdot 10^{-15}$	$1,8239 \cdot 10^{-15}$	$2,0445 \cdot 10^{-15}$	$1,7350 \cdot 10^{-15}$	$1,7349 \cdot 10^{-15}$
52128	$4,2472 \cdot 10^{-9}$	$4,2714 \cdot 10^{-9}$	$4,8437 \cdot 10^{-9}$	$4,0572 \cdot 10^{-9}$	$4,0567 \cdot 10^{-9}$
52129	$8,9217 \cdot 10^{-12}$	$8,9223 \cdot 10^{-12}$	$8,5848 \cdot 10^{-12}$	$8,5680 \cdot 10^{-12}$	$8,5679 \cdot 10^{-12}$
52129 ^m	$4,1612 \cdot 10^{-9}$	$4,1614 \cdot 10^{-9}$	$3,9951 \cdot 10^{-9}$	$3,9950 \cdot 10^{-9}$	$3,9950 \cdot 10^{-9}$
52130	$5,2221 \cdot 10^{-3}$	$5,2225 \cdot 10^{-3}$	$5,0138 \cdot 10^{-3}$	$5,0138 \cdot 10^{-3}$	$5,0138 \cdot 10^{-3}$
52131	$9,6988 \cdot 10^{-11}$	$9,6996 \cdot 10^{-11}$	$9,3119 \cdot 10^{-11}$	$9,3119 \cdot 10^{-11}$	$9,3119 \cdot 10^{-11}$
52131 ^m	$9,1835 \cdot 10^{-10}$	$9,1843 \cdot 10^{-10}$	$8,8172 \cdot 10^{-10}$	$8,8174 \cdot 10^{-10}$	$8,8177 \cdot 10^{-10}$
52132	$2,5761 \cdot 10^{-10}$	$2,5761 \cdot 10^{-10}$	$3,3844 \cdot 10^{-10}$	$2,5882 \cdot 10^{-10}$	$2,5882 \cdot 10^{-10}$
52133	$1,5116 \cdot 10^{-19}$	$1,5094 \cdot 10^{-19}$	$1,9830 \cdot 10^{-19}$	$1,5165 \cdot 10^{-19}$	$1,5165 \cdot 10^{-19}$
52133 ^m	$9,8815 \cdot 10^{-20}$	$9,8815 \cdot 10^{-20}$	$1,2982 \cdot 10^{-19}$	$9,9279 \cdot 10^{-20}$	$9,9279 \cdot 10^{-20}$
53125	$2,1923 \cdot 10^{-22}$	$<10^{-25}$	$1,4095 \cdot 10^{-22}$	$<10^{-25}$	$<10^{-25}$
53126	$5,2854 \cdot 10^{-17}$	$5,2858 \cdot 10^{-17}$	$5,0802 \cdot 10^{-17}$	$5,0738 \cdot 10^{-17}$	$5,0747 \cdot 10^{-17}$
53127	$1,3191 \cdot 10^{-11}$	$1,3193 \cdot 10^{-11}$	$1,2682 \cdot 10^{-11}$	$1,2663 \cdot 10^{-11}$	$1,2664 \cdot 10^{-11}$
53128	$7,1750 \cdot 10^{-15}$	$7,2683 \cdot 10^{-15}$	$9,3576 \cdot 10^{-15}$	$6,7823 \cdot 10^{-15}$	$6,7823 \cdot 10^{-15}$
53129	$1,3068 \cdot 10^{-8}$	$1,3068 \cdot 10^{-8}$	$1,2584 \cdot 10^{-8}$	$1,2550 \cdot 10^{-8}$	$1,2550 \cdot 10^{-8}$
53130	$2,9743 \cdot 10^{-12}$	$3,4368 \cdot 10^{-12}$	$2,9723 \cdot 10^{-12}$	$2,9419 \cdot 10^{-12}$	$2,9394 \cdot 10^{-12}$
53131	$4,9229 \cdot 10^{-5}$	$4,9229 \cdot 10^{-5}$	$4,9226 \cdot 10^{-5}$	$4,7485 \cdot 10^{-5}$	$4,7485 \cdot 10^{-5}$
53132	$4,0278 \cdot 10^{-11}$	$4,0278 \cdot 10^{-11}$	$4,3457 \cdot 10^{-11}$	$3,9255 \cdot 10^{-11}$	$3,9255 \cdot 10^{-11}$
53133	$2,0527 \cdot 10^{-15}$	$2,0558 \cdot 10^{-15}$	$2,6908 \cdot 10^{-15}$	$2,0600 \cdot 10^{-15}$	$2,0597 \cdot 10^{-15}$
53134	$2,0432 \cdot 10^{-18}$	$2,5023 \cdot 10^{-18}$	$2,0445 \cdot 10^{-18}$	$2,0421 \cdot 10^{-18}$	$2,0405 \cdot 10^{-18}$

53134 ^m	$9,3737 \cdot 10^{-25}$	$9,6792 \cdot 10^{-25}$	$1,2581 \cdot 10^{-24}$	$1,0946 \cdot 10^{-24}$	$1,2839 \cdot 10^{-24}$
53135	$1,5917 \cdot 10^{-23}$	$1,8019 \cdot 10^{-23}$	$1,2413 \cdot 10^{-23}$	$<10^{-25}$	$<10^{-25}$
54127	$4,4175 \cdot 10^{-14}$	$4,5014 \cdot 10^{-14}$	$5,8444 \cdot 10^{-14}$	$4,1659 \cdot 10^{-14}$	$4,1659 \cdot 10^{-14}$
54127 ^m	$1,7388 \cdot 10^{-19}$	$1,7605 \cdot 10^{-19}$	$2,2680 \cdot 10^{-19}$	$1,6425 \cdot 10^{-19}$	$1,6425 \cdot 10^{-19}$
54128	$5,0078 \cdot 10^{-8}$	$5,0703 \cdot 10^{-8}$	$6,5308 \cdot 10^{-8}$	$4,7305 \cdot 10^{-8}$	$4,7304 \cdot 10^{-8}$
54129	$4,7534 \cdot 10^{-11}$	$4,8062 \cdot 10^{-11}$	$6,0527 \cdot 10^{-11}$	$4,4990 \cdot 10^{-11}$	$4,4989 \cdot 10^{-11}$
54129 ^m	$2,0315 \cdot 10^{-12}$	$2,0477 \cdot 10^{-12}$	$2,4286 \cdot 10^{-12}$	$1,9332 \cdot 10^{-12}$	$1,9336 \cdot 10^{-12}$
54130	$1,3250 \cdot 10^{-5}$	$1,3328 \cdot 10^{-5}$	$1,5156 \cdot 10^{-5}$	$1,2654 \cdot 10^{-5}$	$1,2654 \cdot 10^{-5}$
54131	$5,7970 \cdot 10^{-1}$	$5,8354 \cdot 10^{-1}$	$6,7346 \cdot 10^{-1}$	$5,5299 \cdot 10^{-1}$	$5,5298 \cdot 10^{-1}$
54131 ^m	$1,2918 \cdot 10^{-7}$	$1,2918 \cdot 10^{-7}$	$1,6958 \cdot 10^{-7}$	$1,2964 \cdot 10^{-7}$	$1,2962 \cdot 10^{-7}$
54132	$4,4749 \cdot 10^{-1}$	$4,4749 \cdot 10^{-1}$	$5,8749 \cdot 10^{-1}$	$4,4902 \cdot 10^{-1}$	$4,4897 \cdot 10^{-1}$
54133	$1,4641 \cdot 10^{-5}$	$1,4660 \cdot 10^{-5}$	$1,9196 \cdot 10^{-5}$	$1,4692 \cdot 10^{-5}$	$1,4690 \cdot 10^{-5}$
54133 ^m	$7,3135 \cdot 10^{-7}$	$7,3135 \cdot 10^{-7}$	$9,6017 \cdot 10^{-7}$	$7,3383 \cdot 10^{-7}$	$7,3370 \cdot 10^{-7}$
54134	$1,3008 \cdot 10^{-6}$	$1,5932 \cdot 10^{-6}$	$1,3015 \cdot 10^{-6}$	$1,3001 \cdot 10^{-6}$	$1,2991 \cdot 10^{-6}$
54135	$1,5848 \cdot 10^{-12}$	$1,9411 \cdot 10^{-12}$	$1,5856 \cdot 10^{-12}$	$1,5839 \cdot 10^{-12}$	$1,5827 \cdot 10^{-12}$
54135 ^m	$1,0467 \cdot 10^{-15}$	$1,2819 \cdot 10^{-15}$	$1,0472 \cdot 10^{-15}$	$1,0461 \cdot 10^{-15}$	$1,0452 \cdot 10^{-15}$
54136	$5,6466 \cdot 10^{-17}$	$6,9172 \cdot 10^{-17}$	$5,6449 \cdot 10^{-17}$	$5,6421 \cdot 10^{-17}$	$5,6391 \cdot 10^{-17}$
55129	$1,4309 \cdot 10^{-15}$	$1,4488 \cdot 10^{-15}$	$1,8661 \cdot 10^{-15}$	$1,3517 \cdot 10^{-15}$	$1,3517 \cdot 10^{-15}$
55130	$1,0421 \cdot 10^{-12}$	$1,0557 \cdot 10^{-12}$	$1,3599 \cdot 10^{-12}$	$9,8503 \cdot 10^{-13}$	$9,8503 \cdot 10^{-13}$
55131	$2,9290 \cdot 10^{-3}$	$2,9672 \cdot 10^{-3}$	$3,8221 \cdot 10^{-3}$	$2,7686 \cdot 10^{-3}$	$2,7686 \cdot 10^{-3}$
55132	$1,0887 \cdot 10^{-6}$	$1,1050 \cdot 10^{-6}$	$1,4175 \cdot 10^{-6}$	$1,0296 \cdot 10^{-6}$	$1,0296 \cdot 10^{-6}$
55133	$3,8038 \cdot 10^{-2}$	$4,6581 \cdot 10^{-2}$	$3,8068 \cdot 10^{-2}$	$3,8030 \cdot 10^{-2}$	$3,7984 \cdot 10^{-2}$
55134	$6,4461 \cdot 10^{-5}$	$7,8960 \cdot 10^{-5}$	$6,4456 \cdot 10^{-5}$	$6,4418 \cdot 10^{-5}$	$6,4396 \cdot 10^{-5}$
55134 ^m	$1,0964 \cdot 10^{-8}$	$1,3427 \cdot 10^{-8}$	$1,0973 \cdot 10^{-8}$	$1,0962 \cdot 10^{-8}$	$1,0948 \cdot 10^{-8}$
55135	$5,4916 \cdot 10^{-8}$	$6,7268 \cdot 10^{-8}$	$5,4889 \cdot 10^{-8}$	$5,4866 \cdot 10^{-8}$	$5,4863 \cdot 10^{-8}$
55135 ^m	$2,5392 \cdot 10^{-13}$	$3,1103 \cdot 10^{-13}$	$2,5390 \cdot 10^{-13}$	$2,5374 \cdot 10^{-13}$	$2,5366 \cdot 10^{-13}$
55136	$5,7768 \cdot 10^{-12}$	$7,0769 \cdot 10^{-12}$	$5,7748 \cdot 10^{-12}$	$5,7710 \cdot 10^{-12}$	$5,7709 \cdot 10^{-12}$
55136 ^m	$2,5717 \cdot 10^{-18}$	$3,1501 \cdot 10^{-18}$	$2,5704 \cdot 10^{-18}$	$2,5693 \cdot 10^{-18}$	$2,5692 \cdot 10^{-18}$
55137	$1,4543 \cdot 10^{-15}$	$1,7814 \cdot 10^{-15}$	$1,4534 \cdot 10^{-15}$	$1,4526 \cdot 10^{-15}$	$1,4526 \cdot 10^{-15}$
55138	$4,3081 \cdot 10^{-23}$	$5,2956 \cdot 10^{-23}$	$4,3316 \cdot 10^{-23}$	$4,0616 \cdot 10^{-23}$	$3,8126 \cdot 10^{-23}$
56129	$5,4395 \cdot 10^{-17}$	$5,5075 \cdot 10^{-17}$	$7,0938 \cdot 10^{-17}$	$5,1383 \cdot 10^{-17}$	$5,1387 \cdot 10^{-17}$
56129 ^m	$4,6600 \cdot 10^{-17}$	$4,7182 \cdot 10^{-17}$	$6,0772 \cdot 10^{-17}$	$4,4020 \cdot 10^{-17}$	$4,4023 \cdot 10^{-17}$
56130	$3,2205 \cdot 10^{-7}$	$3,2607 \cdot 10^{-7}$	$4,1999 \cdot 10^{-7}$	$3,0421 \cdot 10^{-7}$	$3,0423 \cdot 10^{-7}$
56131	$8,8312 \cdot 10^{-4}$	$8,9467 \cdot 10^{-4}$	$1,1525 \cdot 10^{-3}$	$8,3481 \cdot 10^{-4}$	$8,3481 \cdot 10^{-4}$
56131 ^m	$3,5137 \cdot 10^{-14}$	$3,5576 \cdot 10^{-14}$	$4,5823 \cdot 10^{-14}$	$3,3191 \cdot 10^{-14}$	$3,3193 \cdot 10^{-14}$
56132	$5,8656 \cdot 10^{-5}$	$5,9388 \cdot 10^{-5}$	$7,6493 \cdot 10^{-5}$	$5,5408 \cdot 10^{-5}$	$5,5409 \cdot 10^{-5}$
56133	$1,4153 \cdot 10^{-7}$	$1,4328 \cdot 10^{-7}$	$1,8455 \cdot 10^{-7}$	$1,3365 \cdot 10^{-7}$	$1,3364 \cdot 10^{-7}$
56133 ^m	$3,6009 \cdot 10^{-10}$	$3,6459 \cdot 10^{-10}$	$4,6959 \cdot 10^{-10}$	$3,4015 \cdot 10^{-10}$	$3,4016 \cdot 10^{-10}$
56134	$2,7604 \cdot 10^{-6}$	$3,3813 \cdot 10^{-6}$	$2,7591 \cdot 10^{-6}$	$2,7579 \cdot 10^{-6}$	$2,7578 \cdot 10^{-6}$
56135	$5,1882 \cdot 10^{-10}$	$6,3548 \cdot 10^{-10}$	$5,1843 \cdot 10^{-10}$	$5,1826 \cdot 10^{-10}$	$5,1825 \cdot 10^{-10}$
56135 ^m	$2,3706 \cdot 10^{-12}$	$2,9038 \cdot 10^{-12}$	$2,3694 \cdot 10^{-12}$	$2,3684 \cdot 10^{-12}$	$2,3683 \cdot 10^{-12}$
56136	$8,5646 \cdot 10^{-12}$	$1,0493 \cdot 10^{-11}$	$8,5627 \cdot 10^{-12}$	$8,5541 \cdot 10^{-12}$	$8,5541 \cdot 10^{-12}$
56136 ^m	$2,2424 \cdot 10^{-22}$	$2,7466 \cdot 10^{-22}$	$2,2407 \cdot 10^{-22}$	$2,2400 \cdot 10^{-22}$	$2,2400 \cdot 10^{-22}$

56137	$4,4887 \cdot 10^{-16}$	$5,5196 \cdot 10^{-16}$	$4,4828 \cdot 10^{-16}$	$4,4782 \cdot 10^{-16}$	$4,4781 \cdot 10^{-16}$
56137 ^m	$2,2433 \cdot 10^{-21}$	$2,7495 \cdot 10^{-21}$	$2,2425 \cdot 10^{-21}$	$2,2404 \cdot 10^{-21}$	$2,2403 \cdot 10^{-21}$
56138	$4,5335 \cdot 10^{-20}$	$5,5510 \cdot 10^{-20}$	$4,4948 \cdot 10^{-20}$	$4,0442 \cdot 10^{-20}$	$3,6416 \cdot 10^{-20}$
57131	$5,1370 \cdot 10^{-25}$	$1,7134 \cdot 10^{-23}$	$5,4188 \cdot 10^{-24}$	$<10^{-25}$	$<10^{-25}$

2.2.2 Анализ особенностей накопления нуклидов в облучаемых композициях без актинидов при разных временах облучения

Анализ накопления нуклидов в облученной In-Sm композиции показывает, что для разного времени облучения наибольшие (наименьшие) удельные концентрации для разных нуклидов получены при разных $Nstep$. Приведены сравнительные значения удельных концентраций отдельных нуклидов для $T_{обл} = 1, 10, 100$ сут (табл. 5, цветом выделены максимальные значения для соответствующих $Nstep$ и $T_{обл}$).

Таблица 5. Сравнительные удельные концентрации нуклидов облученной In-Sm композиции

$T_{обл}, \text{сут}$	$Nstep$					
	100	1000	5000	10000	50000	100000
^4He						
1	$3,4762 \cdot 10^{-9}$	$2,5200 \cdot 10^{-9}$	—	$2,1369 \cdot 10^{-9}$	—	$2,1371 \cdot 10^{-9}$
10	—	$2,9064 \cdot 10^{-8}$	—	$2,1101 \cdot 10^{-8}$	$2,5458 \cdot 10^{-8}$	$1,7907 \cdot 10^{-8}$
100	—	$5,4776 \cdot 10^{-8}$	$5,5490 \cdot 10^{-8}$	$7,0647 \cdot 10^{-8}$	$5,1810 \cdot 10^{-8}$	$5,1809 \cdot 10^{-8}$
^{133}I						
1	$1,7245 \cdot 10^{-2}$	$1,7245 \cdot 10^{-2}$	—	$1,9224 \cdot 10^{-2}$	—	$1,7052 \cdot 10^{-2}$
10	—	$1,2905 \cdot 10^{-5}$	—	$1,2904 \cdot 10^{-5}$	$1,2904 \cdot 10^{-5}$	$1,4384 \cdot 10^{-5}$
100	—	$2,0527 \cdot 10^{-15}$	$2,0558 \cdot 10^{-15}$	$2,6908 \cdot 10^{-15}$	$2,0600 \cdot 10^{-15}$	$2,0597 \cdot 10^{-15}$
^{128}Xe						
1	$3,4543 \cdot 10^{-9}$	$2,5006 \cdot 10^{-9}$	—	$2,1174 \cdot 10^{-9}$	—	$2,1180 \cdot 10^{-9}$
10	—	$2,8801 \cdot 10^{-8}$	—	$2,0861 \cdot 10^{-8}$	$2,5214 \cdot 10^{-8}$	$1,7665 \cdot 10^{-8}$
100	—	$5,0078 \cdot 10^{-8}$	$5,0703 \cdot 10^{-8}$	$6,5308 \cdot 10^{-8}$	$4,7305 \cdot 10^{-8}$	$4,7304 \cdot 10^{-8}$
^{133}Xe						
1	$1,9218 \cdot 10^{-2}$	$1,9218 \cdot 10^{-2}$	—	$2,1422 \cdot 10^{-2}$	—	$1,9002 \cdot 10^{-2}$
10	—	$1,2133 \cdot 10^{-2}$	—	$1,2131 \cdot 10^{-2}$	$1,2130 \cdot 10^{-2}$	$1,3521 \cdot 10^{-2}$
100	—	$1,4641 \cdot 10^{-5}$	$1,4660 \cdot 10^{-5}$	$1,9196 \cdot 10^{-5}$	$1,4692 \cdot 10^{-5}$	$1,4690 \cdot 10^{-5}$
^{134}Xe						
1	$2,2340 \cdot 10^{-7}$	$2,2340 \cdot 10^{-7}$	—	$2,4903 \cdot 10^{-7}$	—	$2,2088 \cdot 10^{-7}$
10	—	$5,3430 \cdot 10^{-12}$	—	$5,3425 \cdot 10^{-12}$	$5,3423 \cdot 10^{-12}$	$5,9551 \cdot 10^{-12}$
100	—	$1,3008 \cdot 10^{-6}$	$1,5932 \cdot 10^{-6}$	$1,3015 \cdot 10^{-6}$	$1,3001 \cdot 10^{-6}$	$1,2991 \cdot 10^{-6}$
^{130}Cs						
1	$7,2128 \cdot 10^{-12}$	$5,2215 \cdot 10^{-12}$	—	$4,4213 \cdot 10^{-12}$	—	$4,4222 \cdot 10^{-12}$
10	—	$4,4201 \cdot 10^{-11}$	—	$3,2016 \cdot 10^{-11}$	$3,8698 \cdot 10^{-11}$	$2,7112 \cdot 10^{-11}$
100	—	$1,0421 \cdot 10^{-12}$	$1,0557 \cdot 10^{-12}$	$1,3599 \cdot 10^{-12}$	$9,8503 \cdot 10^{-13}$	$9,8503 \cdot 10^{-13}$
^{134}Cs						
1	$9,6570 \cdot 10^{-9}$	$9,6570 \cdot 10^{-9}$	—	$1,0764 \cdot 10^{-8}$	—	$9,5477 \cdot 10^{-9}$
10	—	$2,6292 \cdot 10^{-6}$	—	$2,6291 \cdot 10^{-6}$	$2,6291 \cdot 10^{-6}$	$2,9307 \cdot 10^{-6}$
100	—	$6,4461 \cdot 10^{-5}$	$7,8960 \cdot 10^{-5}$	$6,4456 \cdot 10^{-5}$	$6,4418 \cdot 10^{-5}$	$6,4396 \cdot 10^{-5}$

Проведенный анализ не выявил каких-либо закономерностей при вычислении удельных концентраций в зависимости от значений $Nstep$. В качестве примера немоного изменения вычисленных концентраций приводится накопление изотопов бария для $T_{обл}=10$ сут (табл.6). Так при варьировании $Nstep$ от 1000 до 100000, наибольшее значение достигается при $Nstep=1000$, далее при $Nstep=10000$ происходит уменьшение значений, а при $Nstep=50000$ наблюдается локальный максимум.

Таблица 6. Накопление изотопов Ва в облученной In-Sm композиции для $T_{обл} = 10$ сут

Нуклид	$Nstep$			
	1000	10000	50000	100000
^{131}Ba	$2,2749 \cdot 10^{-1}$	$1,6479 \cdot 10^{-1}$	$1,9918 \cdot 10^{-1}$	$1,3955 \cdot 10^{-1}$
^{131m}Ba	$2,0256 \cdot 10^{-14}$	$1,4671 \cdot 10^{-14}$	$1,7733 \cdot 10^{-14}$	$1,2424 \cdot 10^{-14}$
^{133}Ba	$5,1431 \cdot 10^{-9}$	$3,7249 \cdot 10^{-9}$	$4,5023 \cdot 10^{-9}$	$3,1543 \cdot 10^{-9}$
^{133m}Ba	$1,6342 \cdot 10^{-10}$	$1,1836 \cdot 10^{-10}$	$1,4306 \cdot 10^{-10}$	$1,0023 \cdot 10^{-10}$

2.2.3 Облучаемые уран-плутониевые композиции

Зависимость вычисляемых удельных концентраций от значений $Nstep$ в расчетах по программе ORIGEN2 на полной матрице элементов выхода ПД рассмотрена на примере облучения нейтронным потоком $F_n=2,72 \cdot 10^{15}$ н/(см²·с) в течение времени до 1000 сут уран-плутониевой композиции (U-Pu) следующего состава: $^{235}\text{U} - 4,8589$, $^{238}\text{U} - 8,5291$, $^{239}\text{Pu} - 3,1495$, $^{240}\text{Pu} - 0,15495$, $^{241}\text{Pu} - 0,012503$ (г-ат), что соответствует топливной загрузке металлического топлива экспериментальной ТВС в реакторе БОР-60 [6]. С вычислительной точки зрения решение системы ОДУ для композиций с делящимися нуклидами должно быть еще более чувствительным к параметру $Nstep$, поскольку каждый акт деления сопровождается появлением ~ 1700 элементов ПД с сильно различающимися независимыми (не кумулятивными) значениями выхода (до 17-и порядков) и периодами полураспада (до 30-и порядков).

Проведенные расчеты по ORIGEN2 показывают, что для нуклидов с зарядом $Z > 80$ (изотопы Tl, Pb, Bi и др.), включая и отдельные изотопы актиноидов, зависимость вычисленных значений концентраций от $Nstep$ существенно проявляется для элементов с «малыми» $\sim 10^{-20}$ значениями (табл. 7). Так, удельные концентрации для ^{209}Pb , ^{209}Bi , ^{222}Rn , ^{228}Ra и др., вычисленные при разных значениях $Nstep$, различаются на несколько порядков. Кроме того, для отдельных элементов ПД (^{87}Kr , ^{90}Rb , ^{90}Sr , ^{93}Y , ^{96}Zr , ^{109}Pd , ^{110}Pd и др.), характеризующихся совсем не малыми удельными концентрациями, вычисляемые значения также оказываются весьма чувствительны к параметрам временной сетки (табл. 7.1). Вместе с тем для небольшого числа нуклидов (например, ^{109}Pd , ^{137}Te , ^{136}Cs) вычисляемые удельные концентрации не зависят (как минимум) от базовых значений $Nstep$.

Таблица 7. Сравнительная удельные концентрации накапливаемых нуклидов в облученной U-Pu композиции для $T_{обл} = 40$ сут

Нуклид	$Nstep$			
	100	1000	10000	50000
^{207}Tl	$3,3807 \cdot 10^{-23}$	$3,4379 \cdot 10^{-23}$	$3,3455 \cdot 10^{-23}$	$3,2150 \cdot 10^{-23}$
^{208}Tl	$7,8896 \cdot 10^{-22}$	$8,1085 \cdot 10^{-22}$	$7,8940 \cdot 10^{-22}$	$7,8981 \cdot 10^{-22}$
^{206}Pb	$3,6621 \cdot 10^{-22}$	$3,5785 \cdot 10^{-22}$	$2,2994 \cdot 10^{-22}$	$<10^{-25}$
^{207}Pb	$6,1798 \cdot 10^{-20}$	$6,5525 \cdot 10^{-20}$	$6,0879 \cdot 10^{-20}$	$5,4731 \cdot 10^{-20}$
^{208}Pb	$5,8553 \cdot 10^{-18}$	$5,8851 \cdot 10^{-18}$	$5,8407 \cdot 10^{-18}$	$5,8392 \cdot 10^{-18}$
^{209}Pb	$<10^{-25}$	$1,1198 \cdot 10^{-23}$	$1,2070 \cdot 10^{-23}$	$<10^{-25}$
^{210}Pb	$3,2771 \cdot 10^{-17}$	$3,2970 \cdot 10^{-17}$	$3,2713 \cdot 10^{-17}$	$3,2724 \cdot 10^{-17}$
^{211}Pb	$2,5657 \cdot 10^{-22}$	$2,5551 \cdot 10^{-22}$	$2,5455 \cdot 10^{-22}$	$2,5172 \cdot 10^{-22}$
^{212}Pb	$4,6155 \cdot 10^{-19}$	$4,6153 \cdot 10^{-19}$	$4,6206 \cdot 10^{-19}$	$4,6239 \cdot 10^{-19}$
^{209}Bi	$<10^{-25}$	$7,2507 \cdot 10^{-22}$	$6,6735 \cdot 10^{-22}$	$<10^{-25}$
^{210}Bi	$1,1567 \cdot 10^{-20}$	$1,1609 \cdot 10^{-20}$	$1,1525 \cdot 10^{-20}$	$1,1515 \cdot 10^{-20}$
^{211}Bi	$1,5139 \cdot 10^{-23}$	$1,5388 \cdot 10^{-23}$	$1,4996 \cdot 10^{-23}$	$1,4623 \cdot 10^{-23}$
^{210}Po	$1,1736 \cdot 10^{-20}$	$1,1742 \cdot 10^{-20}$	$1,1594 \cdot 10^{-20}$	$1,1033 \cdot 10^{-20}$
^{220}Rn	$7,1105 \cdot 10^{-22}$	$7,1106 \cdot 10^{-22}$	$7,1084 \cdot 10^{-22}$	$7,1105 \cdot 10^{-22}$
^{222}Rn	$<10^{-25}$	$2,2959 \cdot 10^{-23}$	$1,9853 \cdot 10^{-23}$	$<10^{-25}$

²²³ Fr	1,4719·10 ⁻²³	1,4652·10 ⁻²³	1,4226·10 ⁻²³	1,2001·10 ⁻²³
²²² Ra	1,8786·10 ⁻²¹	1,8839·10 ⁻²¹	1,8732·10 ⁻²¹	1,8735·10 ⁻²¹
²²³ Ra	1,1702·10 ⁻¹⁹	1,1701·10 ⁻¹⁹	1,1667·10 ⁻¹⁹	1,1536·10 ⁻¹⁹
²²⁴ Ra	4,0431·10 ⁻¹⁸	4,0431·10 ⁻¹⁸	4,0433·10 ⁻¹⁸	4,0441·10 ⁻¹⁸
²²⁵ Ra	1,4890·10 ⁻²¹	1,4867·10 ⁻²¹	1,4473·10 ⁻²¹	8,6296·10 ⁻²²
²²⁶ Ra	5,1455·10 ⁻¹⁸	5,1455·10 ⁻¹⁸	5,1453·10 ⁻¹⁸	5,1464·10 ⁻¹⁸
²²⁸ Ra	<10 ⁻²⁵	3,4804·10 ⁻²³	4,4932·10 ⁻²⁴	<10 ⁻²⁵
²²⁵ Ac	9,0520·10 ⁻²²	9,0318·10 ⁻²²	8,3453·10 ⁻²²	<10 ⁻²⁵
²²⁶ Ac	8,9754·10 ⁻²²	8,9795·10 ⁻²²	8,9801·10 ⁻²²	7,6348·10 ⁻²²
²²⁷ Ac	5,5513·10 ⁻¹⁶	5,5513·10 ⁻¹⁶	5,5515·10 ⁻¹⁶	5,5533·10 ⁻¹⁶
²²⁸ Ac	7,1018·10 ⁻²¹	7,1014·10 ⁻²¹	7,1020·10 ⁻²¹	7,1042·10 ⁻²¹
²³² U	3,7040·10 ⁻¹²	3,7040·10 ⁻¹²	3,7042·10 ⁻¹²	3,7055·10 ⁻¹²
²³³ U	1,2470·10 ⁻⁹	1,2470·10 ⁻⁹	1,2471·10 ⁻⁹	1,2477·10 ⁻⁹
²³⁴ U	1,0030·10 ⁻⁴	1,0030·10 ⁻⁴	1,0030·10 ⁻⁴	1,0036·10 ⁻⁴
²³⁵ U	4,7823	4,7823	4,7826	4,7874
^{235m} U	1,1936·10 ⁻¹⁰	1,1928·10 ⁻¹⁰	1,1929·10 ⁻¹⁰	1,1935·10 ⁻¹⁰
²³⁶ U	1,2436·10 ⁻²	1,2436·10 ⁻²	1,2437·10 ⁻²	1,2443·10 ⁻²
²³⁷ U	4,8884·10 ⁻⁵	4,8882·10 ⁻⁵	4,8890·10 ⁻⁵	4,8965·10 ⁻⁵
²³⁸ U	8,5085	8,5081	8,5100	8,5291
²³⁹ U	7,6299·10 ⁻⁶	7,6295·10 ⁻⁶	7,6313·10 ⁻⁶	7,6483·10 ⁻⁶
²³⁷ Np	1,4430·10 ⁻⁴	1,4429·10 ⁻⁴	1,4431·10 ⁻⁴	1,4443·10 ⁻⁴
²³⁹ Np	1,0982·10 ⁻³	1,1014·10 ⁻³	1,1016·10 ⁻³	1,1037·10 ⁻³
²⁴⁰ Np	7,8938·10 ⁻⁹	7,9091·10 ⁻⁹	7,9105·10 ⁻⁹	7,9252·10 ⁻⁹
²³⁸ Pu	1,7276·10 ⁻⁵	1,7276·10 ⁻⁵	1,7276·10 ⁻⁵	1,7267·10 ⁻⁵
²³⁹ Pu	3,1056	3,1056	3,1055	3,1016
²⁴⁰ Pu	1,6000·10 ⁻¹	1,6000·10 ⁻¹	1,6000·10 ⁻¹	1,6017·10 ⁻¹
²⁴¹ Pu	1,2567·10 ⁻²	1,2567·10 ⁻²	1,2566·10 ⁻²	1,2550·10 ⁻²
²⁴² Pu	4,4069·10 ⁻⁵	4,4069·10 ⁻⁵	4,4072·10 ⁻⁵	4,4035·10 ⁻⁵
²⁴³ Pu	7,0153·10 ⁻¹⁰	7,0153·10 ⁻¹⁰	7,0158·10 ⁻¹⁰	7,0099·10 ⁻⁵
²⁴⁴ Pu	4,8990·10 ⁻¹⁴	4,8942·10 ⁻¹⁴	4,8941·10 ⁻¹⁴	4,8928·10 ⁻¹⁴
²⁴⁵ Pu	4,8952·10 ⁻¹⁹	4,8859·10 ⁻¹⁹	4,8858·10 ⁻¹⁹	4,8845·10 ⁻¹⁹
²⁴¹ Am	6,5570·10 ⁻⁵	6,5570·10 ⁻⁵	6,5570·10 ⁻⁵	6,5527·10 ⁻⁵
²⁴² Am	1,4184·10 ⁻⁸	1,4184·10 ⁻⁸	1,4184·10 ⁻⁸	1,4175·10 ⁻⁸
^{242m} Am	3,2817·10 ⁻⁸	3,2817·10 ⁻⁸	3,2816·10 ⁻⁸	3,2804·10 ⁻⁸
²⁴³ Am	4,6615·10 ⁻⁸	4,6615·10 ⁻⁸	4,6616·10 ⁻⁸	4,6594·10 ⁻⁸
^{244m} Am	2,3548·10 ⁻¹³	2,3517·10 ⁻¹³	2,3517·10 ⁻¹³	2,3506·10 ⁻¹³
²⁴² Cm	2,2484·10 ⁻⁷	2,2484·10 ⁻⁷	2,2483·10 ⁻⁷	2,2475·10 ⁻⁷
²⁴³ Cm	1,7723·10 ⁻¹⁰	1,7723·10 ⁻¹⁰	1,7723·10 ⁻¹⁰	1,7718·10 ⁻¹⁰
²⁴⁴ Cm	1,2650·10 ⁻¹⁰	1,2638·10 ⁻¹⁰	1,2638·10 ⁻¹⁰	1,2635·10 ⁻¹⁰
²⁴⁵ Cm	9,1046·10 ⁻¹⁴	9,0821·10 ⁻¹⁴	9,0819·10 ⁻¹⁴	9,0805·10 ⁻¹⁴
²⁴⁶ Cm	3,7577·10 ⁻¹⁷	3,7461·10 ⁻¹⁷	3,7460·10 ⁻¹⁷	3,7455·10 ⁻¹⁷
²⁴⁷ Cm	6,6674·10 ⁻²¹	6,6211·10 ⁻²¹	6,5655·10 ⁻²¹	6,1047·10 ⁻²¹

Таблица 7.1. Сравнительные удельные концентрации отдельных элементов ПД в облученной U-Pu композиции для Тобл = 40 сут

Нуклид	Nstep				
	100	1000	5000	10000	50000
36084	8,9668·10 ⁻⁴	9,0383·10 ⁻⁴	8,9698·10 ⁻⁴	8,9730·10 ⁻⁴	9,1432·10 ⁻⁴
36085	2,8208·10 ⁻⁴	2,8232·10 ⁻⁴	2,8496·10 ⁻⁴	2,8815·10 ⁻⁴	2,8301·10 ⁻⁴
36085 ^m	8,3838·10 ⁻⁶	8,3807·10 ⁻⁶	8,5113·10 ⁻⁶	8,6133·10 ⁻⁶	8,4534·10 ⁻⁶
36086	1,7472·10 ⁻³	1,7472·10 ⁻³	1,7569·10 ⁻³	1,7787·10 ⁻³	1,7778·10 ⁻³

36087	$4,3417 \cdot 10^{-6}$	$4,3309 \cdot 10^{-6}$	$4,3574 \cdot 10^{-6}$	$4,3557 \cdot 10^{-6}$	$4,4938 \cdot 10^{-6}$
37085	$9,8840 \cdot 10^{-4}$	$9,8933 \cdot 10^{-4}$	$9,9908 \cdot 10^{-4}$	$1,0109 \cdot 10^{-3}$	$9,9180 \cdot 10^{-4}$
37086	$5,0335 \cdot 10^{-7}$	$5,0451 \cdot 10^{-7}$	$5,1093 \cdot 10^{-7}$	$5,0962 \cdot 10^{-7}$	$5,0411 \cdot 10^{-7}$
37086 ^m	$8,3217 \cdot 10^{-12}$	$8,3244 \cdot 10^{-12}$	$8,3553 \cdot 10^{-12}$	$8,3843 \cdot 10^{-12}$	$8,3233 \cdot 10^{-12}$
37087	$2,2965 \cdot 10^{-3}$	$2,2970 \cdot 10^{-3}$	$2,3117 \cdot 10^{-3}$	$2,3000 \cdot 10^{-3}$	$2,3718 \cdot 10^{-3}$
37088	$1,3922 \cdot 10^{-6}$	$1,3773 \cdot 10^{-6}$	$1,3791 \cdot 10^{-6}$	$1,3814 \cdot 10^{-6}$	$1,3894 \cdot 10^{-6}$
37089	$1,5037 \cdot 10^{-6}$	$1,4230 \cdot 10^{-6}$	$1,5039 \cdot 10^{-6}$	$1,5046 \cdot 10^{-6}$	$1,5414 \cdot 10^{-6}$
37090	$2,3266 \cdot 10^{-7}$	$2,3266 \cdot 10^{-7}$	$2,2142 \cdot 10^{-7}$	$2,2085 \cdot 10^{-7}$	$2,3391 \cdot 10^{-7}$
38089	$3,0668 \cdot 10^{-3}$	$3,1260 \cdot 10^{-3}$	$3,0682 \cdot 10^{-3}$	$3,0695 \cdot 10^{-3}$	$3,1432 \cdot 10^{-3}$
38090	$4,8147 \cdot 10^{-3}$	$4,8154 \cdot 10^{-3}$	$4,8913 \cdot 10^{-3}$	$4,9741 \cdot 10^{-3}$	$4,8354 \cdot 10^{-3}$
38091	$7,3278 \cdot 10^{-5}$	$7,3277 \cdot 10^{-5}$	$7,3761 \cdot 10^{-5}$	$7,3691 \cdot 10^{-5}$	$7,3395 \cdot 10^{-5}$
39090	$1,1290 \cdot 10^{-6}$	$1,1293 \cdot 10^{-6}$	$1,1463 \cdot 10^{-6}$	$1,1651 \cdot 10^{-6}$	$1,1340 \cdot 10^{-6}$
39090 ^m	$6,3183 \cdot 10^{-10}$	$6,3163 \cdot 10^{-10}$	$6,3170 \cdot 10^{-10}$	$6,3160 \cdot 10^{-10}$	$6,3108 \cdot 10^{-10}$
39091	$4,1184 \cdot 10^{-3}$	$4,0358 \cdot 10^{-3}$	$4,0623 \cdot 10^{-3}$	$4,0553 \cdot 10^{-3}$	$4,0380 \cdot 10^{-3}$
39091 ^m	$3,8065 \cdot 10^{-6}$	$3,6379 \cdot 10^{-6}$	$3,6622 \cdot 10^{-6}$	$3,6559 \cdot 10^{-6}$	$3,6411 \cdot 10^{-6}$
39092	$2,9463 \cdot 10^{-5}$	$2,9464 \cdot 10^{-5}$	$2,9479 \cdot 10^{-5}$	$2,9499 \cdot 10^{-5}$	$3,1544 \cdot 10^{-5}$
39093	$9,2813 \cdot 10^{-5}$	$9,3304 \cdot 10^{-5}$	$9,3380 \cdot 10^{-5}$	$9,3460 \cdot 10^{-5}$	$9,9584 \cdot 10^{-5}$
39093 ^m	$8,2809 \cdot 10^{-10}$	$8,2703 \cdot 10^{-10}$	$8,2666 \cdot 10^{-10}$	$8,2743 \cdot 10^{-10}$	$8,8139 \cdot 10^{-10}$
39094	$3,0547 \cdot 10^{-6}$	$2,9962 \cdot 10^{-6}$	$3,0548 \cdot 10^{-6}$	$3,0558 \cdot 10^{-6}$	$3,0986 \cdot 10^{-6}$
40094	$6,4485 \cdot 10^{-3}$	$6,4616 \cdot 10^{-3}$	$6,4501 \cdot 10^{-3}$	$6,4517 \cdot 10^{-3}$	$6,5400 \cdot 10^{-3}$
40095	$5,4837 \cdot 10^{-3}$	$5,4856 \cdot 10^{-3}$	$5,5056 \cdot 10^{-3}$	$5,5319 \cdot 10^{-3}$	$5,4901 \cdot 10^{-3}$
40096	$6,7946 \cdot 10^{-3}$	$6,7947 \cdot 10^{-3}$	$6,8002 \cdot 10^{-3}$	$6,8079 \cdot 10^{-3}$	$7,2510 \cdot 10^{-3}$
40097	$1,7151 \cdot 10^{-4}$	$1,7151 \cdot 10^{-4}$	$1,7157 \cdot 10^{-4}$	$1,7165 \cdot 10^{-4}$	$1,7993 \cdot 10^{-4}$
42095	$2,8692 \cdot 10^{-4}$	$2,8691 \cdot 10^{-4}$	$2,8794 \cdot 10^{-4}$	$2,8932 \cdot 10^{-4}$	$2,8712 \cdot 10^{-4}$
42096	$6,0892 \cdot 10^{-6}$	$6,0892 \cdot 10^{-6}$	$6,0960 \cdot 10^{-6}$	$6,1051 \cdot 10^{-6}$	$6,0919 \cdot 10^{-6}$
42097	$6,6727 \cdot 10^{-3}$	$6,6749 \cdot 10^{-3}$	$6,6865 \cdot 10^{-3}$	$6,6749 \cdot 10^{-3}$	$6,9935 \cdot 10^{-3}$
42098	$6,9771 \cdot 10^{-3}$	$6,9773 \cdot 10^{-3}$	$6,9788 \cdot 10^{-3}$	$6,9904 \cdot 10^{-3}$	$7,2989 \cdot 10^{-3}$
43098	$8,7011 \cdot 10^{-9}$	$8,7012 \cdot 10^{-9}$	$8,7085 \cdot 10^{-9}$	$8,7186 \cdot 10^{-9}$	$8,8883 \cdot 10^{-9}$
43099	$6,4471 \cdot 10^{-3}$	$6,4472 \cdot 10^{-3}$	$6,4595 \cdot 10^{-3}$	$6,4756 \cdot 10^{-3}$	$6,7634 \cdot 10^{-3}$
43099 ^m	$5,6796 \cdot 10^{-5}$	$5,6797 \cdot 10^{-5}$	$5,6906 \cdot 10^{-5}$	$5,7048 \cdot 10^{-5}$	$5,9592 \cdot 10^{-5}$
43100	$1,0995 \cdot 10^{-10}$	$1,0995 \cdot 10^{-10}$	$1,1015 \cdot 10^{-10}$	$1,1042 \cdot 10^{-10}$	$1,1515 \cdot 10^{-10}$
43101	$2,3929 \cdot 10^{-6}$	$2,3893 \cdot 10^{-6}$	$2,3947 \cdot 10^{-6}$	$2,3984 \cdot 10^{-6}$	$2,4859 \cdot 10^{-6}$
43102	$1,3797 \cdot 10^{-8}$	$1,3790 \cdot 10^{-8}$	$1,3835 \cdot 10^{-8}$	$1,3859 \cdot 10^{-8}$	$1,4180 \cdot 10^{-8}$
43102 ^m	$2,2036 \cdot 10^{-9}$	$2,2039 \cdot 10^{-9}$	$2,2035 \cdot 10^{-9}$	$2,2038 \cdot 10^{-9}$	$2,2024 \cdot 10^{-9}$
43103	$1,2989 \cdot 10^{-7}$	$1,2989 \cdot 10^{-7}$	$1,3035 \cdot 10^{-7}$	$1,2958 \cdot 10^{-7}$	$1,3205 \cdot 10^{-7}$
43104	$2,1749 \cdot 10^{-6}$	$2,1393 \cdot 10^{-6}$	$2,1545 \cdot 10^{-6}$	$2,1768 \cdot 10^{-6}$	$2,2182 \cdot 10^{-6}$
43105	$6,9032 \cdot 10^{-7}$	$6,8261 \cdot 10^{-7}$	$6,7861 \cdot 10^{-7}$	$6,9040 \cdot 10^{-7}$	$6,9622 \cdot 10^{-7}$
44103	$4,1421 \cdot 10^{-3}$	$4,1424 \cdot 10^{-3}$	$4,1766 \cdot 10^{-3}$	$4,1444 \cdot 10^{-3}$	$4,2163 \cdot 10^{-3}$
44104	$4,7911 \cdot 10^{-3}$	$4,7977 \cdot 10^{-3}$	$4,8649 \cdot 10^{-3}$	$4,7963 \cdot 10^{-3}$	$4,8875 \cdot 10^{-3}$
44105	$2,4303 \cdot 10^{-5}$	$2,4585 \cdot 10^{-5}$	$2,4819 \cdot 10^{-5}$	$2,4586 \cdot 10^{-5}$	$2,4785 \cdot 10^{-5}$
44106	$2,5998 \cdot 10^{-3}$	$2,5998 \cdot 10^{-3}$	$2,6131 \cdot 10^{-3}$	$2,6211 \cdot 10^{-3}$	$2,6012 \cdot 10^{-3}$
44107	$2,0122 \cdot 10^{-7}$	$2,0123 \cdot 10^{-7}$	$1,9716 \cdot 10^{-7}$	$1,9732 \cdot 10^{-7}$	$2,0562 \cdot 10^{-7}$
45103	$1,6340 \cdot 10^{-3}$	$1,6311 \cdot 10^{-3}$	$1,6445 \cdot 10^{-3}$	$1,6318 \cdot 10^{-3}$	$1,6603 \cdot 10^{-3}$
46106	$1,1021 \cdot 10^{-4}$	$1,1022 \cdot 10^{-4}$	$1,1080 \cdot 10^{-4}$	$1,1104 \cdot 10^{-4}$	$1,1034 \cdot 10^{-4}$
46107	$1,9463 \cdot 10^{-3}$	$1,9985 \cdot 10^{-3}$	$1,9579 \cdot 10^{-3}$	$1,9698 \cdot 10^{-3}$	$1,9910 \cdot 10^{-3}$
46108	$1,2696 \cdot 10^{-3}$	$1,2699 \cdot 10^{-3}$	$1,2971 \cdot 10^{-3}$	$1,3023 \cdot 10^{-3}$	$1,3367 \cdot 10^{-3}$
46109	$1,7298 \cdot 10^{-5}$	$1,7299 \cdot 10^{-5}$	$2,0165 \cdot 10^{-5}$	$1,7383 \cdot 10^{-5}$	$1,7418 \cdot 10^{-5}$
46109 ^m	$1,4287 \cdot 10^{-10}$	$1,4290 \cdot 10^{-10}$	$1,4296 \cdot 10^{-10}$	$1,4298 \cdot 10^{-10}$	$1,4292 \cdot 10^{-10}$
46110	$5,3938 \cdot 10^{-4}$	$5,3939 \cdot 10^{-4}$	$5,3976 \cdot 10^{-4}$	$5,4026 \cdot 10^{-4}$	$5,6920 \cdot 10^{-4}$
46111	$2,1589 \cdot 10^{-7}$	$2,1458 \cdot 10^{-7}$	$2,1485 \cdot 10^{-7}$	$2,1556 \cdot 10^{-7}$	$2,1591 \cdot 10^{-7}$
46111 ^m	$8,6391 \cdot 10^{-8}$	$8,6391 \cdot 10^{-8}$	$8,6417 \cdot 10^{-8}$	$8,6467 \cdot 10^{-8}$	$8,6369 \cdot 10^{-8}$

46112	$9,0825 \cdot 10^{-6}$	$9,0825 \cdot 10^{-6}$	$9,0918 \cdot 10^{-6}$	$9,1024 \cdot 10^{-6}$	$9,6821 \cdot 10^{-6}$
46113	$9,5363 \cdot 10^{-9}$	$9,5363 \cdot 10^{-9}$	$9,4825 \cdot 10^{-9}$	$9,4544 \cdot 10^{-9}$	$9,8666 \cdot 10^{-9}$
47109	$8,4207 \cdot 10^{-4}$	$8,4220 \cdot 10^{-4}$	$9,8121 \cdot 10^{-4}$	$8,4486 \cdot 10^{-4}$	$8,4685 \cdot 10^{-4}$
47109 ^m	$1,4135 \cdot 10^{-8}$	$1,4140 \cdot 10^{-8}$	$1,6484 \cdot 10^{-8}$	$1,4198 \cdot 10^{-8}$	$1,4227 \cdot 10^{-8}$
47110	$2,9397 \cdot 10^{-11}$	$2,9401 \cdot 10^{-11}$	$3,4238 \cdot 10^{-11}$	$2,9496 \cdot 10^{-11}$	$2,9563 \cdot 10^{-11}$
47110 ^m	$1,2402 \cdot 10^{-7}$	$1,2403 \cdot 10^{-7}$	$1,3767 \cdot 10^{-7}$	$1,2428 \cdot 10^{-7}$	$1,2446 \cdot 10^{-7}$
48109	$7,1272 \cdot 10^{-12}$	$7,1272 \cdot 10^{-12}$	$7,2084 \cdot 10^{-12}$	$7,1508 \cdot 10^{-12}$	$7,1255 \cdot 10^{-12}$
48110	$1,4126 \cdot 10^{-6}$	$1,4127 \cdot 10^{-6}$	$1,7274 \cdot 10^{-6}$	$1,5610 \cdot 10^{-6}$	$1,4206 \cdot 10^{-6}$
48111	$2,7614 \cdot 10^{-4}$	$2,8034 \cdot 10^{-4}$	$2,8216 \cdot 10^{-4}$	$2,7764 \cdot 10^{-4}$	$2,7606 \cdot 10^{-4}$
48111 ^m	$1,1426 \cdot 10^{-12}$	$1,1420 \cdot 10^{-12}$	$1,1583 \cdot 10^{-12}$	$1,1496 \cdot 10^{-12}$	$1,1459 \cdot 10^{-12}$
48112	$2,7630 \cdot 10^{-4}$	$2,7630 \cdot 10^{-4}$	$2,7659 \cdot 10^{-4}$	$2,7689 \cdot 10^{-4}$	$2,9442 \cdot 10^{-4}$
48113	$2,4512 \cdot 10^{-4}$	$2,4518 \cdot 10^{-4}$	$2,5129 \cdot 10^{-4}$	$2,4566 \cdot 10^{-4}$	$2,5739 \cdot 10^{-4}$
48113 ^m	$3,9888 \cdot 10^{-6}$	$3,9900 \cdot 10^{-6}$	$4,0578 \cdot 10^{-6}$	$3,9976 \cdot 10^{-6}$	$4,1875 \cdot 10^{-6}$
48114	$2,2563 \cdot 10^{-4}$	$2,2566 \cdot 10^{-4}$	$2,2756 \cdot 10^{-4}$	$2,2837 \cdot 10^{-4}$	$2,3534 \cdot 10^{-4}$
48115	$1,4750 \cdot 10^{-5}$	$1,4783 \cdot 10^{-5}$	$1,4908 \cdot 10^{-5}$	$1,5045 \cdot 10^{-5}$	$1,4908 \cdot 10^{-5}$
48115 ^m	$3,2212 \cdot 10^{-5}$	$3,2218 \cdot 10^{-5}$	$3,2349 \cdot 10^{-5}$	$3,2491 \cdot 10^{-5}$	$3,2351 \cdot 10^{-5}$
48116	$2,0754 \cdot 10^{-4}$	$2,0757 \cdot 10^{-4}$	$2,0855 \cdot 10^{-4}$	$2,0968 \cdot 10^{-4}$	$2,0820 \cdot 10^{-4}$
48117	$6,5325 \cdot 10^{-7}$	$6,5282 \cdot 10^{-7}$	$6,5486 \cdot 10^{-7}$	$6,5585 \cdot 10^{-7}$	$7,1047 \cdot 10^{-7}$
51121	$2,2020 \cdot 10^{-4}$	$2,2022 \cdot 10^{-4}$	$2,2165 \cdot 10^{-4}$	$2,2326 \cdot 10^{-4}$	$2,2126 \cdot 10^{-4}$
51122	$6,2126 \cdot 10^{-8}$	$6,2131 \cdot 10^{-8}$	$6,2402 \cdot 10^{-8}$	$6,2703 \cdot 10^{-8}$	$6,2318 \cdot 10^{-8}$
51122 ^m	$1,6080 \cdot 10^{-11}$	$1,6081 \cdot 10^{-11}$	$1,6085 \cdot 10^{-11}$	$1,6090 \cdot 10^{-11}$	$1,6068 \cdot 10^{-11}$
51123	$2,3731 \cdot 10^{-4}$	$2,3733 \cdot 10^{-4}$	$2,3847 \cdot 10^{-4}$	$2,3813 \cdot 10^{-4}$	$2,6244 \cdot 10^{-4}$
51124	$2,5752 \cdot 10^{-6}$	$2,5751 \cdot 10^{-6}$	$2,5758 \cdot 10^{-6}$	$2,5755 \cdot 10^{-6}$	$2,5847 \cdot 10^{-6}$
52135	$2,4723 \cdot 10^{-8}$	$2,4723 \cdot 10^{-8}$	$2,4725 \cdot 10^{-8}$	$2,4726 \cdot 10^{-8}$	$2,4749 \cdot 10^{-8}$
52136	$8,6413 \cdot 10^{-9}$	$8,6413 \cdot 10^{-9}$	$8,6416 \cdot 10^{-9}$	$8,6419 \cdot 10^{-9}$	$8,6488 \cdot 10^{-9}$
52137	$3,1261 \cdot 10^{-10}$	$3,1261 \cdot 10^{-10}$	$3,1264 \cdot 10^{-10}$	$3,1263 \cdot 10^{-10}$	$3,1290 \cdot 10^{-10}$
54134	$9,0416 \cdot 10^{-3}$	$9,0732 \cdot 10^{-3}$	$9,0428 \cdot 10^{-3}$	$9,0462 \cdot 10^{-3}$	$9,0426 \cdot 10^{-3}$
54136	$7,8419 \cdot 10^{-3}$	$7,8422 \cdot 10^{-3}$	$7,8718 \cdot 10^{-3}$	$7,8829 \cdot 10^{-3}$	$7,8450 \cdot 10^{-3}$
54137	$6,5310 \cdot 10^{-7}$	$6,5312 \cdot 10^{-7}$	$6,4523 \cdot 10^{-7}$	$6,4601 \cdot 10^{-7}$	$6,5562 \cdot 10^{-7}$
54138	$2,2548 \cdot 10^{-6}$	$2,2537 \cdot 10^{-6}$	$2,2542 \cdot 10^{-6}$	$2,2552 \cdot 10^{-6}$	$2,3240 \cdot 10^{-6}$
55135	$8,1978 \cdot 10^{-3}$	$8,1779 \cdot 10^{-3}$	$8,1901 \cdot 10^{-3}$	$8,2049 \cdot 10^{-3}$	$8,1863 \cdot 10^{-3}$
55135 ^m	$1,4902 \cdot 10^{-8}$	$1,4893 \cdot 10^{-8}$	$1,4894 \cdot 10^{-8}$	$1,4895 \cdot 10^{-8}$	$1,4882 \cdot 10^{-8}$
55136	$3,9078 \cdot 10^{-5}$	$3,9074 \cdot 10^{-5}$	$3,9084 \cdot 10^{-5}$	$3,9093 \cdot 10^{-5}$	$3,9050 \cdot 10^{-5}$
55137	$7,4780 \cdot 10^{-3}$	$7,4791 \cdot 10^{-3}$	$7,5097 \cdot 10^{-3}$	$7,5440 \cdot 10^{-3}$	$7,5058 \cdot 10^{-3}$
55140	$1,5633 \cdot 10^{-7}$	$1,5633 \cdot 10^{-7}$	$1,5644 \cdot 10^{-7}$	$1,5294 \cdot 10^{-7}$	$1,5645 \cdot 10^{-7}$
56138	$7,5167 \cdot 10^{-3}$	$7,5197 \cdot 10^{-3}$	$7,5200 \cdot 10^{-3}$	$7,5234 \cdot 10^{-3}$	$7,7182 \cdot 10^{-3}$
56139	$1,4374 \cdot 10^{-5}$	$1,4700 \cdot 10^{-5}$	$1,4818 \cdot 10^{-5}$	$1,4714 \cdot 10^{-5}$	$1,4770 \cdot 10^{-5}$
56140	$2,7539 \cdot 10^{-3}$	$2,7540 \cdot 10^{-3}$	$2,7739 \cdot 10^{-3}$	$2,7793 \cdot 10^{-3}$	$2,7556 \cdot 10^{-3}$
56141	$2,9452 \cdot 10^{-6}$	$2,9300 \cdot 10^{-6}$	$2,9332 \cdot 10^{-6}$	$2,9447 \cdot 10^{-6}$	$2,9636 \cdot 10^{-6}$
59145	$3,6468 \cdot 10^{-5}$	$3,6469 \cdot 10^{-5}$	$3,7016 \cdot 10^{-5}$	$3,7478 \cdot 10^{-5}$	$3,8452 \cdot 10^{-5}$
59146	$1,9623 \cdot 10^{-6}$	$1,9609 \cdot 10^{-6}$	$1,9640 \cdot 10^{-6}$	$1,9669 \cdot 10^{-6}$	$2,0901 \cdot 10^{-6}$
59147	$7,5448 \cdot 10^{-7}$	$7,3987 \cdot 10^{-7}$	$7,4047 \cdot 10^{-7}$	$7,5519 \cdot 10^{-7}$	$7,8556 \cdot 10^{-7}$

2.2.4 Демонстрация различий накопления нуклидов в уран-плутониевых композициях при временах облучения до 100 сут

Результаты расчета состава облучаемой U-Pu композиции при разных значениях $Nstep$ (табл. 7.1) демонстрируют для достаточно большого числа нуклидов заметную чувствительность вычисляемых удельных концентраций к параметрам временной сетки. Для наглядности наблюдаемые различия удельных концентраций (табл. 8), полученные при разных $Nstep$, представлены относительно значений при $Nstep=100$ в виде

$$K = \left| \frac{M_{Nstep} - M_{Nstep=100}}{M_{Nstep=100}} \right| \cdot 100\%$$

Различия ~ 3 – 7% наблюдаются для ^{87}Kr , ^{90}Rb , ^{90}Sr , ^{90}Y , ^{93}Y , ^{96}Zr , ^{97}Zr и др. При этом значения удельной концентрации ^{90}Rb в расчетах при $Nstep=100, 1000, 50000$ практически совпадают (~ 0,5%), а при $Nstep=5000, 10000$ различаются до ~ 5%. В то же время для изотопов ^{92}Y , ^{93}Y максимальное наблюдаемое различие при базовых значениях $Nstep$ составляет ~ 8% (при $Nstep=50000$).

Таблица 8. Значения K (%) отдельных изотопов с $Z=36 - 60$ облученной U-Pu композиции для $T_{об.л} = 40$ сут

Нуклид	$Nstep$			
	1000	5000	10000	50000
Z=36				
^{85}Kr	0	1	2,5	0,5
^{85m}Kr	0	1,5	3	1
Z=37				
^{87}Rb	0	1	0	3,5
^{89}Rb	5,5	0	0	2,5
^{90}Rb	0	5	5	1
Z=38				
^{89}Sr	2	0	0	2,5
^{90}Sr	0	1,5	3,5	0,5
Z=39				
^{90}Y	0	1,5	3,5	0,5
^{91m}Y	4,5	4	4	4,5
^{93}Y	1	1	1	7,5
Z=40				
^{94}Zr	0,5	0	0	1,5
^{96}Zr	0	0	0	7
Z=42				
^{95}Mo	0	0,5	1	0
^{99}Mo	0	0	0,5	5
Z=43				
^{99}Tc	0	0	0,5	5
^{104}Tc	2	1	0	2
^{105}Tc	1,5	2	0	1
Z=44				
^{105}Ru	1,5	2,5	1,5	2
^{107}Ru	0	2	2	2,5
Z=45				
^{103}Rh	0	1	0,5	2
Z=46				
^{107}Pd	3	1	1,5	2,5
^{108}Pd	0	2,5	2,5	5,5
^{109}Pd	0	17,0	0,5	1
^{110}Pd	0	0	0	6
Z=47				
^{109}Ag	0	17	0,5	1
^{110}Ag	0	17	0,5	0,5
^{110m}Ag	0	11	0,5	0,5
Z=48				
^{110}Cd	0	23	11	1

¹¹¹ Cd	2	2,5	1	0
¹¹³ Cd	0	2,5	0,5	5
¹¹⁷ Cd	0	0	0,5	9
Z=51				
¹²² Sb	0	0,5	1	0,5
¹²³ Sb	0	0,5	0,5	11
Z=54				
¹³⁷ Xe	0	1,5	1	0,5
¹³⁸ Xe	0	0	0	3
Z=55				
¹³⁷ Cs	0	0,5	1	0,5
¹⁴⁰ Cs	0	0	2,5	0
Z=56				
¹³⁹ Ba	2,5	3	2,5	3
¹⁴¹ Ba	0,5	0,5	0	1
Z=59				
¹⁴⁵ Pr	0	1,5	3	5,5
¹⁴⁶ Pr	0	0	0,5	6,5
¹⁴⁷ Pr	2	2	0	4,5
¹⁴⁸ Pr	0	8	0	1
¹⁴⁹ Pr	0	0,5	1	6,5
Z=60				
¹⁴⁵ Nd	0	1	2,5	5
¹⁴⁶ Nd	0	0	0,5	6,5
¹⁴⁷ Nd	0	2	0,5	4,5
¹⁴⁸ Nd	0	8	0	1
¹⁴⁹ Nd	0,5	1	1	8,5
¹⁵⁰ Nd	0	0	0,5	11,5

Для $T_{\text{обл}} = 1$ и 40 сут динамика возникающих различий вычисляемых удельных концентраций при разных $Nstep$, включая и не базовые значения, позволяет говорить о сложном, явно немонотонном, характере изменения вычисляемых удельных концентраций, зависящем от параметра $Nstep$. При этом для разных нуклидов наибольшие (M_{max}) и наименьшие (M_{min}) значения наблюдаются при разных $Nstep$ ($Nstep^{\text{max}}$ и $Nstep^{\text{min}}$), а их различие δ представляется как

$$\delta = \frac{M_{\text{max}} - M_{\text{min}}}{M_{\text{max}}} \cdot 100\%$$

Ниже приведены подтверждающие примеры.

	$Nstep^{\text{max}}$	$Nstep^{\text{min}}$	$\delta, \%$	
⁸⁶ Kr	1000	100 и 1000	~ 2	$T_{\text{обл}}=40$ сут
	500	100	~ 10	$T_{\text{обл}}=1$ сут
¹⁰⁷ Pd	50000	100	~ 3	$T_{\text{обл}}=40$ сут
	1000	10000	~ 2	$T_{\text{обл}}=1$ сут
¹⁰⁸ Pd	50000	100	~ 6	$T_{\text{обл}}=40$ сут
	1000	50000	~ 5	$T_{\text{обл}}=1$ сут
¹¹⁰ Cd	5000	1000	~ 23	$T_{\text{обл}}=40$ сут
	200	1000	~ 3	$T_{\text{обл}}=1$ сут
¹¹⁷ Cd	50000	1000	~ 9	$T_{\text{обл}}=40$ сут
	10000	50000	~ 7	$T_{\text{обл}}=1$ сут

^{123}Sb	50000	100	~ 11	$T_{\text{обл}}=40$ сут
	1000	50000	~ 9	$T_{\text{обл}}=1$ сут
^{146}Pr	50000	1000	~ 6.5	$T_{\text{обл}}=40$ сут
	800	5000	~ 7.5	$T_{\text{обл}}=1$ сут
^{148}Pr	50000	5000	~ 9	$T_{\text{обл}}=40$ сут
	5000	100	~ 10.5	$T_{\text{обл}}=1$ сут
^{150}Nd	50000	1000	~ 12	$T_{\text{обл}}=40$ сут
	1000	50000	~ 9	$T_{\text{обл}}=1$ сут

Примеры показывают, что величина различий δ между полученными наибольшими и наименьшими значениями удельных концентраций для одних и тех же нуклидов может существенно изменяться в процессе облучения. Так, для ^{110}Cd значение δ возрастает с $\sim 3\%$ ($T_{\text{обл}} = 1$ сут) до 23% ($T_{\text{обл}} = 40$ сут), а для ^{86}Kr снижается с 10% ($T_{\text{обл}} = 1$ сут) до $\sim 2\%$ ($T_{\text{обл}} = 40$ сут). Для ряда нуклидов наблюдаемые различия для $T_{\text{обл}} = 1$ сут практически нивелируются для $T_{\text{обл}} = 40$ сут, например, для ^{88}Rb с 7 до 0.5% , для ^{140}Ba с 6 до 1% и др. Такая разнообразная картина полученных значений удельных концентраций для одних и тех же нуклидов при разных $Nstep$ служит основанием для вывода об отсутствии каких-либо систематик, касающихся зависимостей вычисляемых значений от $Nstep$. Кроме того, более детальный анализ результатов, полученных при $Nstep$ с изменяющимся более мелким шагом, например, 50 или 100 ($Nstep=100, 200, \dots, 500, 750, 1000$) и 1000 или 500 ($Nstep=1000, 2000, 2500 \dots 10000$) демонстрирует еще большую дифференциацию вычисляемых значений с непредсказуемым характером получаемых отличий. В подтверждение этому приведены значения удельных концентраций отдельных нуклидов облучаемой In-Sm композиции (табл. 9), полученные в расчетах по программе ORIGEN2 при не базовых значениях $Nstep$ для $T_{\text{обл}} = 10$ сут (для удобства указаны три значащие цифры после запятой, цветом выделены близкие значения к локальным максимумам).

Таблица 9. Сравнительные удельные концентрации отдельных элементов ПД в облученной In-Sm композиции для $T_{\text{обл}} = 10$ сут

Нук- лид	$Nstep$								
	100	500	750	1000	2000	10000	50000	80000	100000
^{126}Sb	6,649·10 ⁻²¹	6,643·10 ⁻²¹	6,644·10 ⁻²¹	6,378·10 ⁻²¹	6,373·10 ⁻²¹	6,282·10 ⁻²¹	5,464·10 ⁻²¹	4,017·10 ⁻²¹	1,764·10 ⁻²¹
$^{131\text{m}}\text{Te}$	4,741·10 ⁻⁹	4,741·10 ⁻⁹	5,942·10 ⁻⁹	5,905·10 ⁻⁹	5,891·10 ⁻⁹	4,722·10 ⁻⁹	4,722·10 ⁻⁹	4,722·10 ⁻⁹	4,722·10 ⁻⁹
^{132}Te	5,327·10 ⁻²	5,327·10 ⁻²	6,998·10 ⁻²	6,998·10 ⁻²	6,978·10 ⁻²	5,352·10 ⁻²	5,352·10 ⁻²	5,352·10 ⁻²	5,352·10 ⁻²
^{128}I	2,330·10 ⁻¹³	2,358·10 ⁻¹³	2,356·10 ⁻¹³	3,038·10 ⁻¹³	3,029·10 ⁻¹³	2,200·10 ⁻¹³	2,659·10 ⁻¹³	1,863·10 ⁻¹³	1,863·10 ⁻¹³
^{133}I	1,276·10 ⁻⁵	1,579·10 ⁻⁵	1,291·10 ⁻⁵	1,290·10 ⁻⁵	1,290·10 ⁻⁵	1,290·10 ⁻⁵	1,290·10 ⁻⁵	1,438·10 ⁻⁵	1,438·10 ⁻⁵
^{133}Xe	1,211·10 ⁻²	1,487·10 ⁻²	1,213·10 ⁻²	1,213·10 ⁻²	1,213·10 ⁻²	1,213·10 ⁻²	1,213·10 ⁻²	1,352·10 ⁻²	1,352·10 ⁻²
^{131}Cs	9,556·10 ⁻²	9,672·10 ⁻²	9,663·10 ⁻²	1,246·10 ⁻¹	1,242·10 ⁻¹	9,023·10 ⁻²	1,091·10 ⁻¹	7,641·10 ⁻²	7,641·10 ⁻²
^{133}Cs	2,582·10 ⁻²	3,162·10 ⁻²	2,578·10 ⁻²	2,578·10 ⁻²	2,578·10 ⁻²	2,578·10 ⁻²	2,578·10 ⁻²	2,874·10 ⁻²	2,874·10 ⁻²
^{130}Ba	1,429·10 ⁻⁷	1,446·10 ⁻⁷	1,444·10 ⁻⁷	1,862·10 ⁻⁷	1,856·10 ⁻⁷	1,349·10 ⁻⁷	1,630·10 ⁻⁷	1,142·10 ⁻⁷	1,142·10 ⁻⁷
^{132}Ba	2,541·10 ⁻⁵	2,571·10 ⁻⁵	2,569·10 ⁻⁵	3,311·10 ⁻⁵	3,301·10 ⁻⁵	2,398·10 ⁻⁵	2,899·10 ⁻⁵	2,031·10 ⁻⁵	2,031·10 ⁻⁵
^{134}Ba	7,961·10 ⁻⁹	9,720·10 ⁻⁹	7,921·10 ⁻⁹	7,921·10 ⁻⁹	7,921·10 ⁻⁹	7,921·10 ⁻⁹	7,920·10 ⁻⁹	8,829·10 ⁻⁹	8,829·10 ⁻⁹

Результаты расчетов по ORIGEN2 для $T_{\text{обл}} = 100$ сут при разных базовых значениях $Nstep$ вновь подтверждают, что различия вычисляемых удельных концентраций для отдельных элементов ПД облученной U-Pu композиции (табл. 10) могут как уменьшаться по сравнению со значениями, полученными для меньших времен облучения, так и увеличиваться. Для ^{90}Sr , ^{90}Y различие между наибольшим и наименьшим значением уменьшается от 3.5% ($T_{\text{обл}} = 40$ сут) до 1.5% ($T_{\text{обл}} = 100$ сут), для ^{110}Cd соответственно от 23% до 5% . Напротив, для ^{106}Pd , ^{111}Pd , ^{116}Cd различие между наибольшим и наименьшим значениями удельных концентраций возрастает от 1% ($T_{\text{обл}} = 40$ сут) до 13% ($T_{\text{обл}} = 100$ сут). Здесь также, как и для

$T_{\text{обл}} = 40$ сут, наблюдается существенная зависимость вычисляемых значений от $Nstep$ для элементов с малыми $\sim 10^{-20}$ значениями (табл. 10.1).

Таблица 10. Сравнительные удельные концентрации отдельных элементов ПД в облученной U-Pu композиции для $T_{\text{обл}} = 100$ сут

Нуклид	<i>Nstep</i>				
	100	1000	10000	50000	100000
⁸⁷ Kr	$4,2575 \cdot 10^{-6}$	$4,2412 \cdot 10^{-6}$	$4,2627 \cdot 10^{-6}$	$4,3382 \cdot 10^{-6}$	$4,3685 \cdot 10^{-6}$
⁹⁰ Rb	$2,2768 \cdot 10^{-7}$	$2,2768 \cdot 10^{-7}$	$2,1802 \cdot 10^{-7}$	$2,2797 \cdot 10^{-7}$	$2,2848 \cdot 10^{-7}$
⁸⁸ Sr	$7,8161 \cdot 10^{-3}$	$7,6843 \cdot 10^{-3}$	$7,6928 \cdot 10^{-3}$	$8,2184 \cdot 10^{-3}$	$7,7342 \cdot 10^{-3}$
⁹⁰ Sr	$1,1885 \cdot 10^{-2}$	$1,1884 \cdot 10^{-2}$	$1,2041 \cdot 10^{-2}$	$1,1903 \cdot 10^{-2}$	$1,1924 \cdot 10^{-2}$
⁹⁰ Y	$2,9516 \cdot 10^{-6}$	$2,9519 \cdot 10^{-6}$	$2,9892 \cdot 10^{-6}$	$2,9567 \cdot 10^{-6}$	$2,9621 \cdot 10^{-6}$
⁹² Y	$2,8848 \cdot 10^{-5}$	$2,8850 \cdot 10^{-5}$	$2,8866 \cdot 10^{-5}$	$2,9647 \cdot 10^{-5}$	$3,0469 \cdot 10^{-5}$
⁹⁶ Zr	$1,6813 \cdot 10^{-2}$	$1,6813 \cdot 10^{-2}$	$1,6825 \cdot 10^{-2}$	$1,7709 \cdot 10^{-2}$	$1,7720 \cdot 10^{-2}$
¹⁰⁶ Pd	$6,4999 \cdot 10^{-4}$	$6,5009 \cdot 10^{-4}$	$6,5286 \cdot 10^{-4}$	$6,7959 \cdot 10^{-4}$	$7,0950 \cdot 10^{-4}$
¹¹⁰ Pd	$1,3359 \cdot 10^{-3}$	$1,3359 \cdot 10^{-3}$	$1,3369 \cdot 10^{-3}$	$1,3696 \cdot 10^{-3}$	$1,4023 \cdot 10^{-3}$
¹¹¹ Pd	$2,1220 \cdot 10^{-7}$	$2,1146 \cdot 10^{-7}$	$2,1118 \cdot 10^{-7}$	$2,2992 \cdot 10^{-7}$	$2,1255 \cdot 10^{-7}$
¹¹¹ Ag	$9,7593 \cdot 10^{-5}$	$9,8629 \cdot 10^{-5}$	$9,9825 \cdot 10^{-5}$	$1,0652 \cdot 10^{-4}$	$9,7818 \cdot 10^{-5}$
¹¹⁶ Ag	$1,0557 \cdot 10^{-8}$	$1,0557 \cdot 10^{-8}$	$1,0445 \cdot 10^{-8}$	$1,1251 \cdot 10^{-8}$	$1,0583 \cdot 10^{-8}$
¹¹⁶ Cd	$5,1394 \cdot 10^{-4}$	$5,1394 \cdot 10^{-4}$	$5,1604 \cdot 10^{-4}$	$5,7973 \cdot 10^{-4}$	$5,1519 \cdot 10^{-4}$
¹¹⁹ In	$6,5749 \cdot 10^{-9}$	$6,5678 \cdot 10^{-9}$	$6,5527 \cdot 10^{-9}$	$6,7814 \cdot 10^{-9}$	$7,0163 \cdot 10^{-9}$
¹²² Sb	$1,3182 \cdot 10^{-7}$	$1,3182 \cdot 10^{-7}$	$1,3246 \cdot 10^{-7}$	$1,5077 \cdot 10^{-7}$	$1,3853 \cdot 10^{-7}$
¹²² Te	$1,8147 \cdot 10^{-6}$	$1,8148 \cdot 10^{-6}$	$1,8222 \cdot 10^{-6}$	$2,0383 \cdot 10^{-6}$	$1,8937 \cdot 10^{-6}$
¹³⁸ Ba	$1,8613 \cdot 10^{-2}$	$2,0311 \cdot 10^{-2}$	$1,8620 \cdot 10^{-2}$	$1,8809 \cdot 10^{-2}$	$1,9015 \cdot 10^{-2}$
¹⁴⁷ Pr	$7,3937 \cdot 10^{-7}$	$7,3957 \cdot 10^{-7}$	$7,2443 \cdot 10^{-7}$	$7,5097 \cdot 10^{-7}$	$7,6383 \cdot 10^{-7}$

Таблица 10.1. Сравнительные удельные концентрации накапливаемых нуклидов в облученной U-Pu композиции для $T_{\text{обл}} = 100$ сут

Нуклид	<i>Nstep</i>				
	100	1000	10000	50000	100000
²⁰⁹ Pb	$2,4742 \cdot 10^{-22}$	$2,5941 \cdot 10^{-22}$	$2,5702 \cdot 10^{-22}$	$2,2941 \cdot 10^{-22}$	$1,9864 \cdot 10^{-22}$
²⁰⁹ Bi	$2,9466 \cdot 10^{-20}$	$2,9066 \cdot 10^{-20}$	$2,7356 \cdot 10^{-20}$	$1,9847 \cdot 10^{-20}$	$1,3695 \cdot 10^{-20}$
²²² Rn	$4,4380 \cdot 10^{-22}$	$4,4374 \cdot 10^{-22}$	$4,4363 \cdot 10^{-22}$	$2,4481 \cdot 10^{-22}$	$<10^{-25}$
²²⁸ Ra	$5,5745 \cdot 10^{-22}$	$5,5200 \cdot 10^{-22}$	$3,0700 \cdot 10^{-22}$	$<10^{-25}$	$<10^{-25}$
²²⁵ Ac	$1,9262 \cdot 10^{-20}$	$1,9251 \cdot 10^{-20}$	$1,9258 \cdot 10^{-20}$	$1,9245 \cdot 10^{-20}$	$1,9207 \cdot 10^{-20}$
²³⁵ Pa	$1,3410 \cdot 10^{-16}$	$1,2571 \cdot 10^{-16}$	$1,3411 \cdot 10^{-16}$	$1,3411 \cdot 10^{-16}$	$1,3357 \cdot 10^{-16}$
²⁴⁰ U	$1,4647 \cdot 10^{-23}$	$1,4136 \cdot 10^{-23}$	$6,6013 \cdot 10^{-24}$	$<10^{-25}$	$<10^{-25}$
²⁴⁷ Cm	$1,6511 \cdot 10^{-18}$	$1,6487 \cdot 10^{-18}$	$1,6485 \cdot 10^{-18}$	$1,6483 \cdot 10^{-18}$	$1,6488 \cdot 10^{-18}$
²⁴⁸ Cm	$9,1672 \cdot 10^{-22}$	$9,0693 \cdot 10^{-22}$	$8,1280 \cdot 10^{-22}$	$2,3420 \cdot 10^{-22}$	$<10^{-25}$

Таким образом, можно утверждать, что в программе ORIGEN2 вычисление удельных концентраций осуществляется с разными погрешностями для разных нуклидов. При этом невозможность вычисления гарантированных погрешностей и их обоснования в программе ORIGEN2 ставит вопросы относительно надежности и достоверности представляемых результатов расчета, что особенно актуально при отсутствии точных решений для многих вычисляемых нуклидов.

Основной вывод:

- Невозможность определения значений $Nstep$ для получения устойчивых решений для всех вычисляемых нуклидов;
- Необходимость (как минимум) представления дифференцированных погрешностей расчета с учетом получаемых различий при разных $Nstep$.

2.2.5 Анализ особенностей вычисляемых удельных концентраций нуклидов в облученной уран-плутониевой композиции для $T_{обл} = 1000$ сут

Расчет накапливаемых нуклидов для больших времен облучения представляет отдельную задачу. Время облучения $T_{обл} = 800 - 1000$ сут, отражающее несколько завышенную длительность макрокампании существующих реакторных систем, рассматривается с целью оценки нуклидного состава отработавшего ядерного топлива с увеличенным уровнем выгорания.

Для $T_{обл} = 1000$ сут для большей части нуклидов различия вычисленных удельных концентраций при разных значениях $Nstep$, составляют $\sim 1 - 3\%$. Однако и здесь для отдельных нуклидов различия могут составлять от 5% (^{73}Ga , ^{107}Rh , ^{129}I , ^{130}I) до 15% (^{101}Ru , ^{117}Sn , ^{138}Cs , ^{138}Ba , ^{134}Ce , ^{146}Pr , ^{146}Nd). Следует отметить, что количество нуклидов, удельная концентрация которых существенно зависит от $Nstep$, для $T_{обл} = 1000$ сут значительно меньше, чем для $T_{обл} = 40$ и 100 сут.

Для полноты анализа по аналогии с п. 2.2.4 сравнительные значения удельных концентраций нуклидов, для которых наблюдается различный характер изменения при увеличении $Nstep$ в расчетах по программе ORIGEN2 для $T_{обл} = 1000$ сут, представлены в таблицах 11 (11.1, 11.2, 11.3). Для одних нуклидов с увеличением $Nstep$ от 1000 до 10000 наблюдаются изменения значений, которые при дальнейшем увеличении $Nstep$ стабилизируются (табл. 11). Для других нуклидов при $Nstep=1000$ и $Nstep=10000$ значения практически не меняются, что приводит к предположению о стабильности получаемых значений, но расчеты при $Nstep=50000$ заметно меняют кажущуюся стабильность (табл.11.1). Также можно указать группу нуклидов, для которых характерен монотонный рост или убывание вычисляемых удельных концентраций при увеличении $Nstep$ (табл. 11.2). Для нуклидов (табл. 11.3) значения при $Nstep=1000$ и 10000 напротив заметно различаются, а при $Nstep=1000$ и $Nstep=50000$ практически совпадают.

Таблица 11. Сравнительные удельные концентрации нуклидов в облученной U-Pu композиции для $T_{обл} = 1000$ сут (стабильность значений при увеличении $Nstep$)

Нуклид	$Nstep$		
	1000	10000	50000
35083	$1,5447 \cdot 10^{-6}$	$1,5402 \cdot 10^{-6}$	$1,5402 \cdot 10^{-6}$
36080	$1,3164 \cdot 10^{-7}$	$1,3000 \cdot 10^{-7}$	$1,3005 \cdot 10^{-7}$
36081 ^m	$3,1555 \cdot 10^{-16}$	$3,1279 \cdot 10^{-16}$	$3,1295 \cdot 10^{-16}$
38088	$6,7112 \cdot 10^{-2}$	$6,5983 \cdot 10^{-2}$	$6,5981 \cdot 10^{-2}$
38091	$5,2595 \cdot 10^{-5}$	$5,2584 \cdot 10^{-5}$	$5,2582 \cdot 10^{-5}$
39091	$8,0751 \cdot 10^{-3}$	$7,9395 \cdot 10^{-3}$	$7,9395 \cdot 10^{-3}$
39091 ^m	$2,6520 \cdot 10^{-6}$	$2,6102 \cdot 10^{-6}$	$2,6107 \cdot 10^{-6}$
42097	$1,4815 \cdot 10^{-1}$	$1,4437 \cdot 10^{-1}$	$1,4445 \cdot 10^{-1}$
43096	$5,9489 \cdot 10^{-16}$	$5,9597 \cdot 10^{-16}$	$5,9598 \cdot 10^{-16}$
49117	$9,3683 \cdot 10^{-8}$	$9,3361 \cdot 10^{-8}$	$9,3418 \cdot 10^{-8}$
49117 ^m	$3,9300 \cdot 10^{-7}$	$3,9126 \cdot 10^{-7}$	$3,9151 \cdot 10^{-7}$
51128	$8,9720 \cdot 10^{-6}$	$9,2696 \cdot 10^{-6}$	$9,2700 \cdot 10^{-6}$
51130	$1,4163 \cdot 10^{-6}$	$1,4029 \cdot 10^{-6}$	$1,3995 \cdot 10^{-6}$
52128	$2,2226 \cdot 10^{-2}$	$2,2098 \cdot 10^{-2}$	$2,2097 \cdot 10^{-2}$
52129	$1,8969 \cdot 10^{-6}$	$1,8903 \cdot 10^{-6}$	$1,8916 \cdot 10^{-6}$
53126	$1,7260 \cdot 10^{-7}$	$1,7224 \cdot 10^{-7}$	$1,7228 \cdot 10^{-7}$
53127	$1,4265 \cdot 10^{-2}$	$1,4235 \cdot 10^{-2}$	$1,4238 \cdot 10^{-2}$
53130	$1,0200 \cdot 10^{-6}$	$9,7973 \cdot 10^{-7}$	$9,8133 \cdot 10^{-7}$
53130 ^m	$7,9819 \cdot 10^{-9}$	$7,6283 \cdot 10^{-9}$	$7,6178 \cdot 10^{-9}$
54133	$1,1239 \cdot 10^{-3}$	$1,1290 \cdot 10^{-3}$	$1,1305 \cdot 10^{-3}$
55133	$1,6867 \cdot 10^{-1}$	$1,6941 \cdot 10^{-1}$	$1,6963 \cdot 10^{-1}$
55134	$3,0966 \cdot 10^{-3}$	$3,1100 \cdot 10^{-3}$	$3,1137 \cdot 10^{-3}$

55134 ^m	$1,2275 \cdot 10^{-7}$	$1,2326 \cdot 10^{-7}$	$1,2340 \cdot 10^{-7}$
56131 ^m	$1,3790 \cdot 10^{-17}$	$1,3842 \cdot 10^{-17}$	$1,3856 \cdot 10^{-17}$
56132	$1,2615 \cdot 10^{-7}$	$1,2663 \cdot 10^{-7}$	$1,2675 \cdot 10^{-7}$

Таблица 11.1. Сравнительные удельные концентрации нуклидов в облученной U-Pu композиции для $T_{\text{обл}} = 1000$ сут (изменения при $Nstep = 50000$)

Нуклид	<i>Nstep</i>		
	1000	10000	50000
1001	$6,9403 \cdot 10^{-9}$	$6,9432 \cdot 10^{-9}$	$6,9856 \cdot 10^{-9}$
35082	$4,7836 \cdot 10^{-7}$	$4,7838 \cdot 10^{-7}$	$4,7928 \cdot 10^{-7}$
37090 ^m	$9,5309 \cdot 10^{-8}$	$9,5307 \cdot 10^{-8}$	$9,4419 \cdot 10^{-8}$
38085	$1,1068 \cdot 10^{-10}$	$1,1072 \cdot 10^{-10}$	$1,1094 \cdot 10^{-10}$
38090	$9,8577 \cdot 10^{-2}$	$9,8574 \cdot 10^{-2}$	$9,8727 \cdot 10^{-2}$
39089 ^m	$8,3881 \cdot 10^{-14}$	$8,3885 \cdot 10^{-14}$	$8,3974 \cdot 10^{-14}$
41091	$7,8221 \cdot 10^{-11}$	$7,8218 \cdot 10^{-11}$	$7,8267 \cdot 10^{-11}$
43105	$5,2295 \cdot 10^{-7}$	$5,2294 \cdot 10^{-7}$	$5,1347 \cdot 10^{-7}$
44108	$1,0466 \cdot 10^{-7}$	$1,0465 \cdot 10^{-7}$	$1,0445 \cdot 10^{-7}$
45108	$6,6192 \cdot 10^{-9}$	$6,6189 \cdot 10^{-9}$	$6,6113 \cdot 10^{-9}$
51130 ^m	$6,7898 \cdot 10^{-8}$	$6,7910 \cdot 10^{-8}$	$6,7995 \cdot 10^{-8}$
52127	$7,3238 \cdot 10^{-6}$	$7,3226 \cdot 10^{-6}$	$7,3271 \cdot 10^{-6}$
54124	$2,4423 \cdot 10^{-18}$	$2,4401 \cdot 10^{-18}$	$2,4539 \cdot 10^{-18}$
59147	$5,5134 \cdot 10^{-7}$	$5,5152 \cdot 10^{-7}$	$5,3690 \cdot 10^{-7}$
60144	$7,5011 \cdot 10^{-2}$	$7,5059 \cdot 10^{-2}$	$7,4998 \cdot 10^{-2}$
60145	$8,5801 \cdot 10^{-2}$	$8,5826 \cdot 10^{-2}$	$8,6199 \cdot 10^{-2}$

Таблица 11.2. Сравнительные удельные концентрации нуклидов в облученной U-Pu композиции для $T_{\text{обл}} = 1000$ сут (монотонный характер изменения от $Nstep$)

Нуклид	<i>Nstep</i>		
	1000	10000	50000
34081	$8,3847 \cdot 10^{-8}$	$8,3368 \cdot 10^{-8}$	$8,2808 \cdot 10^{-8}$
35081	$5,2369 \cdot 10^{-3}$	$5,2378 \cdot 10^{-3}$	$5,2414 \cdot 10^{-3}$
38082	$1,7356 \cdot 10^{-22}$	$1,8725 \cdot 10^{-22}$	$4,3525 \cdot 10^{-22}$
39090	$2,5714 \cdot 10^{-5}$	$2,5721 \cdot 10^{-5}$	$2,5751 \cdot 10^{-5}$
46111	$1,6753 \cdot 10^{-7}$	$1,6698 \cdot 10^{-7}$	$1,6647 \cdot 10^{-7}$
51127	$7,1117 \cdot 10^{-5}$	$7,1547 \cdot 10^{-5}$	$7,1597 \cdot 10^{-5}$
51130	$1,4163 \cdot 10^{-6}$	$1,4029 \cdot 10^{-6}$	$1,3905 \cdot 10^{-6}$
53129	$3,4772 \cdot 10^{-2}$	$3,3150 \cdot 10^{-2}$	$3,3103 \cdot 10^{-2}$
54133	$1,1239 \cdot 10^{-3}$	$1,1290 \cdot 10^{-3}$	$1,1305 \cdot 10^{-3}$
54133 ^m	$1,6729 \cdot 10^{-5}$	$1,6791 \cdot 10^{-5}$	$1,6807 \cdot 10^{-5}$
53130 ^m	$7,9819 \cdot 10^{-9}$	$7,6283 \cdot 10^{-9}$	$7,6178 \cdot 10^{-9}$
56133	$2,6089 \cdot 10^{-8}$	$2,6121 \cdot 10^{-8}$	$2,6143 \cdot 10^{-8}$
56133 ^m	$2,1098 \cdot 10^{-11}$	$2,1187 \cdot 10^{-11}$	$2,1212 \cdot 10^{-11}$

Таблица 11.3. Сравнительные удельные концентрации нуклидов в облученной U-Pu композиции для $T_{\text{обл}} = 1000$ сут (немонотонный характер изменения от $Nstep$)

Нуклид	$Nstep$		
	1000	10000	50000
ZAAA			
36081	$6,2782 \cdot 10^{-9}$	$6,2604 \cdot 10^{-9}$	$6,2703 \cdot 10^{-9}$
37089	$1,0732 \cdot 10^{-6}$	$1,0425 \cdot 10^{-6}$	$1,0729 \cdot 10^{-6}$
38089	$5,2842 \cdot 10^{-3}$	$5,3250 \cdot 10^{-3}$	$5,2852 \cdot 10^{-3}$
39086	$6,1379 \cdot 10^{-22}$	$6,1618 \cdot 10^{-22}$	$6,2345 \cdot 10^{-22}$
39087 ^m	$8,2337 \cdot 10^{-17}$	$8,2827 \cdot 10^{-17}$	$8,2328 \cdot 10^{-17}$
39088	$1,4939 \cdot 10^{-8}$	$1,5028 \cdot 10^{-8}$	$1,4937 \cdot 10^{-8}$
39089	$7,9184 \cdot 10^{-2}$	$7,9786 \cdot 10^{-2}$	$7,9185 \cdot 10^{-2}$
39090 ^m	$7,6153 \cdot 10^{-10}$	$7,6327 \cdot 10^{-10}$	$7,6142 \cdot 10^{-10}$
43104	$1,6345 \cdot 10^{-6}$	$1,6197 \cdot 10^{-6}$	$1,6032 \cdot 10^{-6}$
44101	$1,4087 \cdot 10^{-1}$	$1,6065 \cdot 10^{-1}$	$1,4089 \cdot 10^{-1}$
47107	$1,2481 \cdot 10^{-8}$	$1,2547 \cdot 10^{-8}$	$1,2491 \cdot 10^{-8}$
51129	$7,2403 \cdot 10^{-6}$	$7,2153 \cdot 10^{-6}$	$7,2758 \cdot 10^{-6}$
54125	$4,6792 \cdot 10^{-14}$	$4,6714 \cdot 10^{-14}$	$4,7140 \cdot 10^{-14}$
54134	$1,9332 \cdot 10^{-1}$	$1,9377 \cdot 10^{-1}$	$1,9334 \cdot 10^{-1}$
55132	$1,1422 \cdot 10^{-7}$	$1,1468 \cdot 10^{-7}$	$1,1481 \cdot 10^{-7}$
59145	$2,6577 \cdot 10^{-5}$	$2,6538 \cdot 10^{-5}$	$2,6740 \cdot 10^{-5}$
59146	$1,4296 \cdot 10^{-6}$	$1,2652 \cdot 10^{-6}$	$1,4282 \cdot 10^{-6}$
60146	$7,1429 \cdot 10^{-2}$	$8,2467 \cdot 10^{-2}$	$7,1442 \cdot 10^{-2}$
60147	$7,5007 \cdot 10^{-4}$	$7,5235 \cdot 10^{-4}$	$7,5298 \cdot 10^{-4}$

Анализ полученных результатов показывает, что наименьшие и наибольшие значения вычисляемых удельных концентраций рассматриваемого нуклида наблюдаются при разных $Nstep$ для разного времени облучения, например, у ^{146}Pr наименьшее значение для $T_{\text{обл}} = 1000$ сут наблюдается при $Nstep=1000$, а для $T_{\text{обл}} = 40$ сут при $Nstep = 50000$.

Следует заметить, что для облучаемых композиций с актинидами (как и для композиций без делящихся элементов, п. 2.2.1) при выполнении расчетов с базовыми значениями $Nstep$ может проявиться некоторая закономерность в характере изменения вычисляемых удельных концентраций, но дополнительные проверочные расчеты, выполненные при других $Nstep$, могут полностью разрушить эту кажущуюся закономерность. Так, при наблюдаемом монотонном характере изменения вычисляемых удельных концентраций (в расчетах с базовыми $Nstep$) значения, полученные при не базовых $Nstep$, могут существенно изменить исходную картину.

Таким образом, последовательное увеличение значений $Nstep$ не приводит к устойчивым закономерностям изменения вычисляемых удельных концентраций нуклидов, подтверждая тем самым невозможность каких-либо рекомендаций по определению и использованию предпочтительных значений $Nstep$ для получения устойчивых значений в расчетах по программе ORIGEN2.

В этой связи остаются нерешенными проблема надежности вычисляемых удельных концентраций и проблема представляемых погрешностей расчета для всех рассматриваемых нуклидов.

2.3 Вычисление «примесных» элементов в задачах нуклидной кинетики

При решении некоторых задач, например, связанных с уточнением состава отработавшего ядерного топлива особый интерес представляют вычисления удельных концентраций нуклидов со значениями меньшими 10^{-22} («примесные» элементы). Также с целью повышения ядерно-радиационной безопасности при анализе определенных ситуаций может возникнуть необходимость расчета накопления именно примесных элементов. Вычисление малых значений примесных элементов связано с определенными мате-

математическими трудностями (алгоритмическими и вычислительными). Расчет таких элементов требует выполнения определенных условий для обеспечения корректности вычислений.

В расчетах по программе ORIGEN2 вычисленные удельные концентрации со значениями $\sim 10^{-22}$ могут различаться на несколько порядков при разных $Nstep$ для одних и тех же нуклидов. При этом в ORIGEN2 значения, которые меньше 10^{-25} , считаются нулевыми. Значимость нуклидов с малыми удельными концентрациями определяется решаемой задачей, и в определенной степени это зависит от начального состава облучаемых композиций и времени облучения. В качестве примера представлены удельные концентрации нескольких примесных элементов облученной In-Sm композиции (см. п. 2.2.1), полученные при разных $Nstep$ и для разных $T_{обл}$ (табл. 12).

Таблица 12. Сравнительные удельные концентрации примесных элементов облученной In-Sm композиции

<i>Nstep</i>					
$T_{обл} = 1 \text{ сут}$					
Нуклид	100	1000	10000	100000	
^{130}Sn	$<10^{-25}$	$1,5346 \cdot 10^{-25}$	$1,6238 \cdot 10^{-24}$	$1,6994 \cdot 10^{-23}$	
^{126}Sb	$8,3946 \cdot 10^{-23}$	$5,7074 \cdot 10^{-23}$	$<10^{-25}$		
^{131}Ce	$<10^{-25}$	$1,9153 \cdot 10^{-24}$	$3,3102 \cdot 10^{-23}$	$4,7555 \cdot 10^{-22}$	
^{131}Pr	$<10^{-25}$	$1,5523 \cdot 10^{-25}$	$3,6203 \cdot 10^{-24}$	$5,8819 \cdot 10^{-23}$	
$T_{обл} = 10 \text{ сут}$					
	1000	10000	50000	100000	
^{124}Te	$1,0130 \cdot 10^{-23}$	$<10^{-25}$			
^{135}I	$8,2119 \cdot 10^{-24}$	$<10^{-25}$			
^{137}Ba	$1,5685 \cdot 10^{-21}$	$1,4101 \cdot 10^{-21}$	$7,6869 \cdot 10^{-22}$	$<10^{-25}$	
$T_{обл} = 100 \text{ сут}$					
	1000	5000	10000	50000	100000
^{128}Sn	$1,5001 \cdot 10^{-23}$	$1,5294 \cdot 10^{-23}$	$1,4981 \cdot 10^{-23}$	$1,7396 \cdot 10^{-23}$	$2,0345 \cdot 10^{-23}$
^{125}I	$2,1923 \cdot 10^{-22}$	$<10^{-25}$	$1,4095 \cdot 10^{-22}$	$<10^{-25}$	
^{135}I	$1,5917 \cdot 10^{-23}$	$1,8019 \cdot 10^{-23}$	$1,2413 \cdot 10^{-23}$	$<10^{-25}$	

3 Сравнительные расчеты по программам ORIGEN2, MZK и MATLAB

С целью уяснения специфики вычислений по программе ORIGEN2 и понимания корректности (или недостоверности) вычисляемых значений проведено сопоставление результатов расчета по программам MZK и MATLAB. Сравнительные результаты представлены для облучаемой нейтронным потоком $F_n = 1,14 \cdot 10^{15} \text{ н}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ In-Sm композиции (см. 2.2.1) для $T_{обл} = 100 \text{ сут}$. Сравнимые результаты получены по программе ORIGEN2 при $Nstep=1000$, расчеты по MZK осуществлены методом $m3$ с $\varepsilon=10^{-6}$, расчеты по MATLAB проведены с использованием методов `ode15s` и `ode15i` (табл. 13).

Анализ показывает, что для большей части нуклидов результаты по MZK и MATLAB совпадают с точностью до 3-го знака, чего нельзя сказать о результатах по ORIGEN2.

Заметим, что для некоторых нуклидов расчеты по MATLAB приводят к отрицательным значениям (выделены цветом в табл.13), указывающим на колебательный характер решений, что связано с появлением комплексных собственных значений для рассматриваемой матрицы. Это относится и к расчетам по MZK, которые также демонстрируют появление колебаний при разных значениях точности [15]. Подобное явление может приводить к различиям вычисляемых значений по программам ORIGEN2 и MZK на некоторых интервалах рассматриваемой временной шкалы. Для наглядности представлена динамика изменения вычисляемых удельных концентраций нуклидов ^{133}Sn и ^{131}Sm , полученных по программам

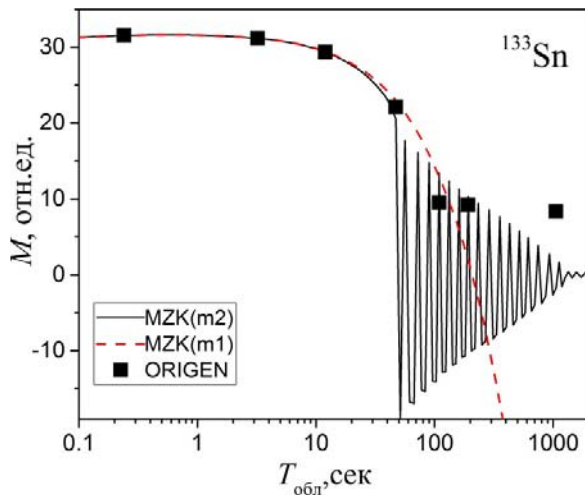
ORIGEN2, MZK и MATLAB, с демонстрацией колебательного характера их изменения, начиная с некоторого момента облучения (рис. 1). Появление колебаний указывает на чувствительность вычислений к шагу интегрирования, обуславливая пересмотр схемы выбора шага в используемом расчетном алгоритме. Подобные результаты также служат основанием для сомнений в достоверности вычисляемых значений по ORIGEN2 и проведении дополнительных расчетов по MZK с большей точностью.

Таблица 13. Сравнительные удельные концентрации отдельных нуклидов облученной In-Sm композиции для $T_{\text{обл}} = 100$ сут в расчетах по ORIGEN2, MZK и MATLAB

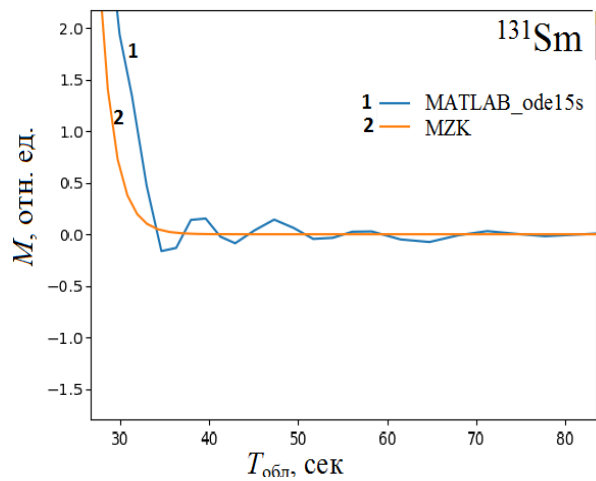
Нуклид ZAAA	ORIGEN2	MZK	MATLAB	
			ode15i	ode15s
1001	$2,7523 \cdot 10^{-7}$	$2,2247 \cdot 10^{-7}$	$2,2247 \cdot 10^{-7}$	$2,2247 \cdot 10^{-7}$
1002	$1,9078 \cdot 10^{-13}$	$1,5352 \cdot 10^{-13}$	$1,5352 \cdot 10^{-13}$	$1,5352 \cdot 10^{-13}$
1003	$3,3607 \cdot 10^{-21}$	$2,7046 \cdot 10^{-21}$	$2,7046 \cdot 10^{-21}$	$2,7046 \cdot 10^{-21}$
2004	$5,4776 \cdot 10^{-8}$	$4,4260 \cdot 10^{-8}$	$4,4260 \cdot 10^{-8}$	$4,4260 \cdot 10^{-8}$
50124	$1,9135 \cdot 10^{-22}$	$1,8483 \cdot 10^{-22}$	$1,8483 \cdot 10^{-22}$	$1,8483 \cdot 10^{-22}$
50125	$1,9149 \cdot 10^{-18}$	$1,7002 \cdot 10^{-18}$	$1,7002 \cdot 10^{-18}$	$1,7002 \cdot 10^{-18}$
50126	$1,9832 \cdot 10^{-18}$	$1,8986 \cdot 10^{-18}$	$1,8986 \cdot 10^{-18}$	$1,8986 \cdot 10^{-18}$
50127	$1,7721 \cdot 10^{-14}$	$1,6966 \cdot 10^{-14}$	$1,6966 \cdot 10^{-14}$	$1,6966 \cdot 10^{-14}$
50128	$1,5001 \cdot 10^{-23}$	$1,4400 \cdot 10^{-23}$	$1,4400 \cdot 10^{-23}$	$1,4400 \cdot 10^{-23}$
50129	$3,1505 \cdot 10^{-23}$	$5,3514 \cdot 10^{-23}$	$-1,8280 \cdot 10^{-23}$	$-4,9472 \cdot 10^{-23}$
51124	$2,7421 \cdot 10^{-20}$	$2,6254 \cdot 10^{-20}$	$2,6254 \cdot 10^{-20}$	$2,6254 \cdot 10^{-20}$
51125	$5,1420 \cdot 10^{-18}$	$4,6093 \cdot 10^{-18}$	$4,6093 \cdot 10^{-18}$	$4,6093 \cdot 10^{-18}$
51126	$2,7781 \cdot 10^{-20}$	$2,6591 \cdot 10^{-20}$	$2,6591 \cdot 10^{-20}$	$2,6591 \cdot 10^{-20}$
51126 ^m	$2,1335 \cdot 10^{-22}$	$2,0421 \cdot 10^{-22}$	$2,0421 \cdot 10^{-22}$	$2,0421 \cdot 10^{-22}$
51127	$7,7968 \cdot 10^{-13}$	$7,4646 \cdot 10^{-13}$	$7,4646 \cdot 10^{-13}$	$7,4646 \cdot 10^{-13}$
51128	$1,2025 \cdot 10^{-15}$	$1,1598 \cdot 10^{-15}$	$1,1620 \cdot 10^{-15}$	$1,1588 \cdot 10^{-15}$
51128 ^m	$2,1096 \cdot 10^{-20}$	$2,0159 \cdot 10^{-20}$	$2,0159 \cdot 10^{-20}$	$2,0159 \cdot 10^{-20}$
51129	$2,6046 \cdot 10^{-20}$	$2,5803 \cdot 10^{-20}$	$2,3177 \cdot 10^{-20}$	$2,2037 \cdot 10^{-20}$
51130	$3,3079 \cdot 10^{-15}$	$3,1670 \cdot 10^{-15}$	$3,1670 \cdot 10^{-15}$	$3,1670 \cdot 10^{-15}$
51131	$3,6410 \cdot 10^{-23}$	$3,4902 \cdot 10^{-23}$	$3,4902 \cdot 10^{-23}$	$3,4902 \cdot 10^{-23}$
51132	$5,0485 \cdot 10^{-24}$	$8,5754 \cdot 10^{-24}$	$-2,9286 \cdot 10^{-24}$	$-7,9277 \cdot 10^{-24}$
52124	$1,8787 \cdot 10^{-20}$	$1,6734 \cdot 10^{-20}$	$1,6734 \cdot 10^{-20}$	$1,6734 \cdot 10^{-20}$
52125	$8,7455 \cdot 10^{-17}$	$6,9959 \cdot 10^{-17}$	$6,9959 \cdot 10^{-17}$	$6,9959 \cdot 10^{-17}$
52126	$6,2350 \cdot 10^{-17}$	$5,9586 \cdot 10^{-17}$	$5,9586 \cdot 10^{-17}$	$5,9586 \cdot 10^{-17}$
52127	$7,8973 \cdot 10^{-14}$	$7,5602 \cdot 10^{-14}$	$7,5602 \cdot 10^{-14}$	$7,5602 \cdot 10^{-14}$
52127 ^m	$1,8147 \cdot 10^{-15}$	$1,6205 \cdot 10^{-15}$	$1,6205 \cdot 10^{-15}$	$1,6205 \cdot 10^{-15}$
52128	$4,2472 \cdot 10^{-9}$	$3,7622 \cdot 10^{-9}$	$3,7623 \cdot 10^{-9}$	$3,7622 \cdot 10^{-9}$
52129	$8,9217 \cdot 10^{-12}$	$8,5437 \cdot 10^{-12}$	$8,5437 \cdot 10^{-12}$	$8,5437 \cdot 10^{-12}$
52129 ^m	$4,1612 \cdot 10^{-9}$	$3,9839 \cdot 10^{-9}$	$3,9839 \cdot 10^{-9}$	$3,9839 \cdot 10^{-9}$
52130	$5,2221 \cdot 10^{-3}$	$4,9996 \cdot 10^{-3}$	$4,9996 \cdot 10^{-3}$	$4,9996 \cdot 10^{-3}$
52131	$9,6988 \cdot 10^{-11}$	$9,2856 \cdot 10^{-11}$	$9,2856 \cdot 10^{-11}$	$9,2856 \cdot 10^{-11}$
52131 ^m	$9,1835 \cdot 10^{-10}$	$8,7922 \cdot 10^{-10}$	$8,7922 \cdot 10^{-10}$	$8,7922 \cdot 10^{-10}$
52132	$2,5761 \cdot 10^{-10}$	$4,3759 \cdot 10^{-10}$	$-1,4948 \cdot 10^{-10}$	$-4,0453 \cdot 10^{-10}$
52133	$1,5116 \cdot 10^{-19}$	$2,5639 \cdot 10^{-19}$	$-8,7582 \cdot 10^{-20}$	$-2,3702 \cdot 10^{-19}$
52133 ^m	$9,8815 \cdot 10^{-20}$	$1,6785 \cdot 10^{-19}$	$-5,7336 \cdot 10^{-20}$	$-1,5517 \cdot 10^{-19}$

53125	2,1923 10 ⁻²²	2,1996 10 ⁻²²	2,1996 10 ⁻²²	2,1996 10 ⁻²²
53126	5,2854 10 ⁻¹⁷	5,0574 10 ⁻¹⁷	5,0574 10 ⁻¹⁷	5,0574 10 ⁻¹⁷
53127	1,3191 10 ⁻¹¹	1,2622 10 ⁻¹¹	1,2622 10 ⁻¹¹	1,2622 10 ⁻¹¹
53128	7,1750 10 ⁻¹⁵	5,7471 10 ⁻¹⁵	5,7456 10 ⁻¹⁵	5,7457 10 ⁻¹⁵
53129	1,3068 10 ⁻⁸	1,2515 10 ⁻⁸	1,2515 10 ⁻⁸	1,2515 10 ⁻⁸
53130	2,9743 10 ⁻¹²	2,9176 10 ⁻¹²	2,9190 10 ⁻¹²	2,9170 10 ⁻¹²
53130 ^m	3,5716 10 ⁻¹⁵	3,4366 10 ⁻¹⁵	3,4409 10 ⁻¹⁵	3,4346 10 ⁻¹⁵
53131	4,9229 10 ⁻⁵	4,7482 10 ⁻⁵	4,7571 10 ⁻⁵	4,7441 10 ⁻⁵
53132	4,0278 10 ⁻¹¹	4,4649 10 ⁻¹¹	2,6952 10 ⁻¹¹	1,9160 10 ⁻¹¹
53132 ^m	3,1657 10 ⁻¹³	3,0534 10 ⁻¹³	3,0591 10 ⁻¹³	3,0508 10 ⁻¹³
53133	2,0527 10 ⁻¹⁵	2,2293 10 ⁻¹⁵	-6,7245 10 ⁻¹²	-6,6651 10 ⁻¹³
53134	2,0432 10 ⁻¹⁸	2,0190 10 ⁻¹⁸	-7,6588 10 ⁻¹⁹	1,7423 10 ⁻¹⁸
53134 ^m	9,3737 10 ⁻²⁵	1,0156 10 ⁻²⁴	-3,0714 10 ⁻²¹	-3,0443 10 ⁻²²
53135	1,5917 10 ⁻²³	1,6073 10 ⁻²³	1,6073 10 ⁻²³	1,6073 10 ⁻²³
54126	5,3715 10 ⁻¹⁷	5,1369 10 ⁻¹⁷	5,1369 10 ⁻¹⁷	5,1369 10 ⁻¹⁷
54127	4,4175 10 ⁻¹⁴	3,5278 10 ⁻¹⁴	3,5278 10 ⁻¹⁴	3,5278 10 ⁻¹⁴
54127 ^m	1,7388 10 ⁻¹⁹	1,3909 10 ⁻¹⁹	1,3909 10 ⁻¹⁹	1,3910 10 ⁻¹⁹
54128	5,0078 10 ⁻⁸	4,0059 10 ⁻⁸	4,0059 10 ⁻⁸	4,0059 10 ⁻⁸
54129	4,7534 10 ⁻¹¹	3,8783 10 ⁻¹¹	3,8783 10 ⁻¹¹	3,8783 10 ⁻¹¹
54129 ^m	2,0315 10 ⁻¹²	1,7408 10 ⁻¹²	1,7408 10 ⁻¹²	1,7408 10 ⁻¹²
54130	1,3250 10 ⁻⁵	1,1714 10 ⁻⁵	1,1714 10 ⁻⁵	1,1714 10 ⁻⁵
54131	5,7970 10 ⁻¹	5,0709 10 ⁻¹	5,0709 10 ⁻¹	5,0709 10 ⁻¹
54131 ^m	1,2918 10 ⁻⁷	1,2905 10 ⁻⁷	1,2906 10 ⁻⁷	1,2906 10 ⁻⁷
54132	4,4749 10 ⁻¹	4,4708 10 ⁻¹	4,4708 10 ⁻¹	4,4708 10 ⁻¹
54133	1,4641 10 ⁻⁵	1,4631 10 ⁻⁵	1,4639 10 ⁻⁵	1,4634 10 ⁻⁵
54133 ^m	7,3135 10 ⁻⁷	7,3069 10 ⁻⁷	7,3069 10 ⁻⁷	7,3069 10 ⁻⁷
54134	1,3008 10 ⁻⁶	1,2854 10 ⁻⁶	1,2854 10 ⁻⁶	1,2854 10 ⁻⁶
54134 ^m	1,0353 10 ⁻¹⁷	1,0346 10 ⁻¹⁷	1,0352 10 ⁻¹⁷	1,0348 10 ⁻¹⁷
54135	1,5848 10 ⁻¹²	1,5661 10 ⁻¹²	1,5661 10 ⁻¹²	1,5661 10 ⁻¹²
54135 ^m	1,0467 10 ⁻¹⁵	1,0343 10 ⁻¹⁵	1,0343 10 ⁻¹⁵	1,0343 10 ⁻¹⁵
54136	5,6466 10 ⁻¹⁷	5,5787 10 ⁻¹⁷	5,5787 10 ⁻¹⁷	5,5787 10 ⁻¹⁷
55129	1,4309 10 ⁻¹⁵	1,1447 10 ⁻¹⁵	1,1447 10 ⁻¹⁵	1,1447 10 ⁻¹⁵
55130	1,0421 10 ⁻¹²	8,3436 10 ⁻¹³	8,3414 10 ⁻¹³	8,3415 10 ⁻¹³
55131	2,9290 10 ⁻³	2,3451 10 ⁻³	2,3445 10 ⁻³	2,3445 10 ⁻³
55132	1,0887 10 ⁻⁶	8,7336 10 ⁻⁷	8,7316 10 ⁻⁷	8,7323 10 ⁻⁷
55133	3,8038 10 ⁻²	3,7588 10 ⁻²	3,7588 10 ⁻²	3,7588 10 ⁻²
55134	6,4461 10 ⁻⁵	6,3688 10 ⁻⁵	6,3688 10 ⁻⁵	6,3688 10 ⁻⁵
55134 ^m	1,0964 10 ⁻⁸	1,0835 10 ⁻⁸	1,0834 10 ⁻⁸	1,0834 10 ⁻⁸
55135	5,4916 10 ⁻⁸	5,4248 10 ⁻⁸	5,4248 10 ⁻⁸	5,4248 10 ⁻⁸
55135 ^m	2,5392 10 ⁻¹³	2,5087 10 ⁻¹³	2,5087 10 ⁻¹³	2,5087 10 ⁻¹³
55136	5,7768 10 ⁻¹²	5,7060 10 ⁻¹²	5,7060 10 ⁻¹²	5,7060 10 ⁻¹²
55136 ^m	2,5717 10 ⁻¹⁸	2,5404 10 ⁻¹⁸	2,5404 10 ⁻¹⁸	2,5404 10 ⁻¹⁸
55137	1,4543 10 ⁻¹⁵	1,4362 10 ⁻¹⁵	1,4362 10 ⁻¹⁵	1,4362 10 ⁻¹⁵
55138	4,3081 10 ⁻²³	4,2688 10 ⁻²³	4,2688 10 ⁻²³	4,2688 10 ⁻²³

55138 ^m	$4,1446 \cdot 10^{-25}$	$4,0927 \cdot 10^{-25}$	$4,0927 \cdot 10^{-25}$	$4,0927 \cdot 10^{-25}$
56129	$5,4395 \cdot 10^{-17}$	$4,3513 \cdot 10^{-17}$	$4,3513 \cdot 10^{-17}$	$4,3513 \cdot 10^{-17}$
56129 ^m	$4,6600 \cdot 10^{-17}$	$3,7277 \cdot 10^{-17}$	$3,7277 \cdot 10^{-17}$	$3,7277 \cdot 10^{-17}$
56130	$3,2205 \cdot 10^{-7}$	$2,5762 \cdot 10^{-7}$	$2,5762 \cdot 10^{-7}$	$2,5762 \cdot 10^{-7}$
56131	$8,8312 \cdot 10^{-4}$	$7,0744 \cdot 10^{-4}$	$7,0731 \cdot 10^{-4}$	$7,0717 \cdot 10^{-4}$
56131 ^m	$3,5137 \cdot 10^{-14}$	$2,8107 \cdot 10^{-14}$	$2,8108 \cdot 10^{-14}$	$2,8108 \cdot 10^{-14}$
56132	$5,8656 \cdot 10^{-5}$	$4,6921 \cdot 10^{-5}$	$4,6921 \cdot 10^{-5}$	$4,6921 \cdot 10^{-5}$
56133	$1,4153 \cdot 10^{-7}$	$1,1320 \cdot 10^{-7}$	$1,1320 \cdot 10^{-7}$	$1,1320 \cdot 10^{-7}$
56133 ^m	$3,6009 \cdot 10^{-10}$	$2,8806 \cdot 10^{-10}$	$2,8806 \cdot 10^{-10}$	$2,8806 \cdot 10^{-10}$
56134	$2,7604 \cdot 10^{-6}$	$2,7268 \cdot 10^{-6}$	$2,7268 \cdot 10^{-6}$	$2,7268 \cdot 10^{-6}$
56135	$5,1882 \cdot 10^{-10}$	$5,1242 \cdot 10^{-10}$	$5,1242 \cdot 10^{-10}$	$5,1242 \cdot 10^{-10}$
56135 ^m	$2,3706 \cdot 10^{-12}$	$2,3417 \cdot 10^{-12}$	$2,3417 \cdot 10^{-12}$	$2,3417 \cdot 10^{-12}$
56136	$8,5646 \cdot 10^{-12}$	$8,4578 \cdot 10^{-12}$	$8,4578 \cdot 10^{-12}$	$8,4578 \cdot 10^{-12}$
56136 ^m	$2,2424 \cdot 10^{-22}$	$2,2148 \cdot 10^{-22}$	$2,2148 \cdot 10^{-22}$	$2,2148 \cdot 10^{-22}$
56137	$4,4887 \cdot 10^{-16}$	$4,4278 \cdot 10^{-16}$	$4,4278 \cdot 10^{-16}$	$4,4278 \cdot 10^{-16}$
56137 ^m	$2,2433 \cdot 10^{-21}$	$2,2151 \cdot 10^{-21}$	$2,2151 \cdot 10^{-21}$	$2,2151 \cdot 10^{-21}$
56138	$4,5335 \cdot 10^{-20}$	$4,4759 \cdot 10^{-20}$	$4,4760 \cdot 10^{-20}$	$4,4760 \cdot 10^{-20}$



а



б

Рис.1 Динамика изменения удельных концентраций ^{131}Sn (а) и ^{131}Sm (б) в расчетах по программам ORIGEN2, MZK и MATLAB

На примере облучения нейтронным потоком $F_n = 1,14 \cdot 10^{15} \text{ н}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ композиции из двух элементов ^{131}Sn и ^{131}Sm с равными массовыми долями анализируется меняющийся характер расхождений, возникающих за 1 сутки облучения при вычислении удельных концентраций по программам ORIGEN2, MZK и MATLAB. Динамика вычисляемых удельных концентраций ^{131}Sb показывает, что для $T_{\text{обл}} < 30000 \text{ с}$ результаты расчетов по всем трем программам практически совпадают (рис.2 а, б). Для $T_{\text{обл}} > 40000 \text{ с}$ вычисляемые значения по ORIGEN2 и MZK заметно различаются, а для $T_{\text{обл}} > 1 \text{ сут}$ (86400 с) полученные значения практически совпадают. При этом результаты расчетов по MATLAB для $T_{\text{обл}} > 40000 \text{ с}$ выбиваются из общей картины (рис.2 в, г). Следует отметить, что расчеты по MATLAB выполнены при использовании стандартных значений расчетных параметров [11]. При этом возможна детальная (ориентированная) настройка параметров, при которых может быть достигнуто точное, полученное аналитически, решение для отдельного рассматриваемого элемента, но подобные настройки не гарантируют обеспечения достоверных решений для всех элементов супержестких систем. Кроме того, априори отсутствуют и точные решения для большей части вычисляемых нуклидов. Для наглядности различия вычисляемых по ORIGEN2 и MZK удельных концентраций ^{147}Eu и ^{82}Sr представлены в виде отношений значений концен-

траций ($M_{\text{ORIG}}/M_{\text{MZK}}$), полученных по ORIGEN2 при разных $Nstep$ и MZK (рис. 3, 4). Результаты приведены для времени облучения 40 и 100 сут (рис. 3а, 4а), 600 сут (рис. 3б) и 1000 сут (рис. 4б).

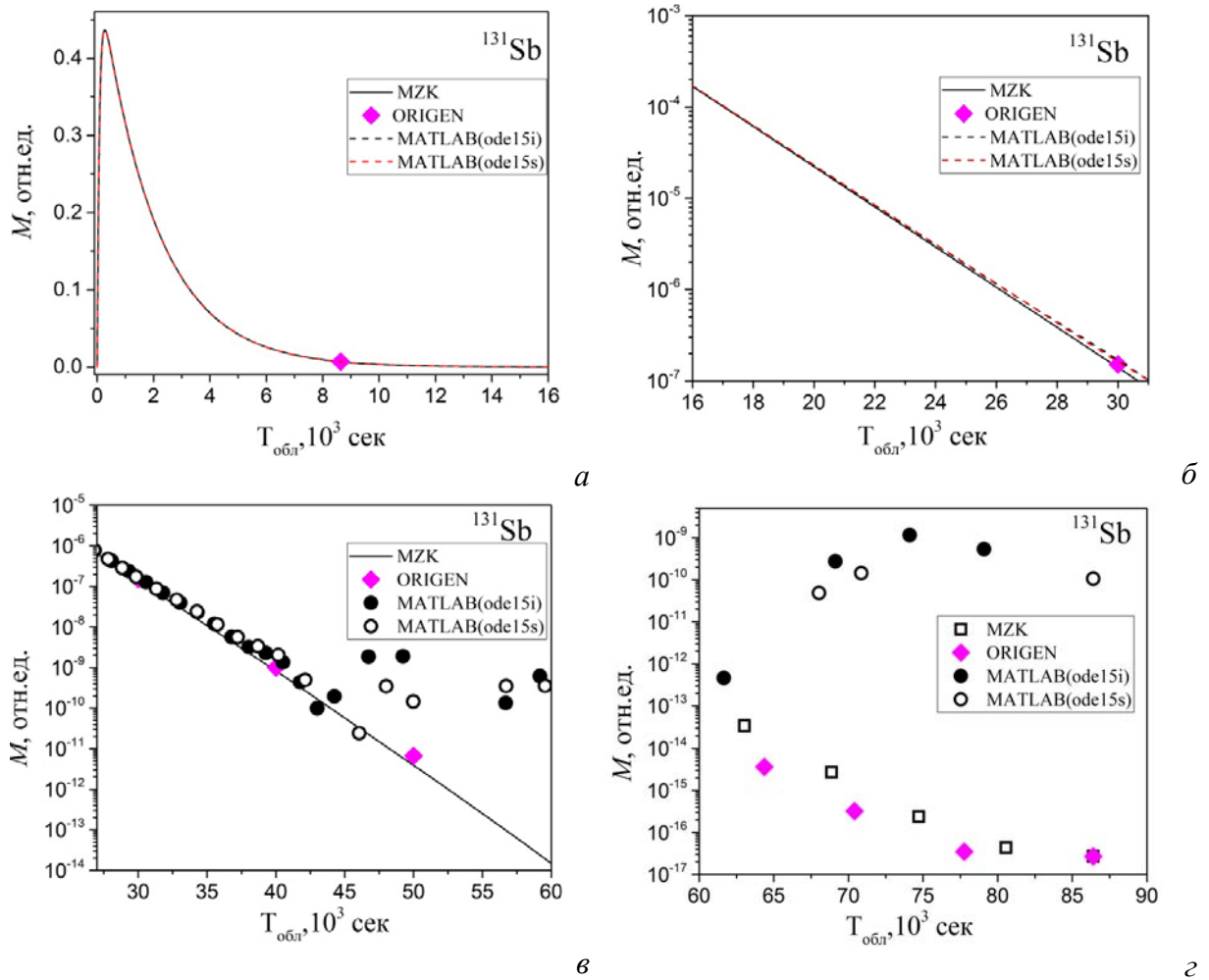


Рис. 2 Динамика изменения удельных концентраций ^{131}Sb в расчетах по программам ORIGEN2, MZK и MATLAB для разных интервалов облучения

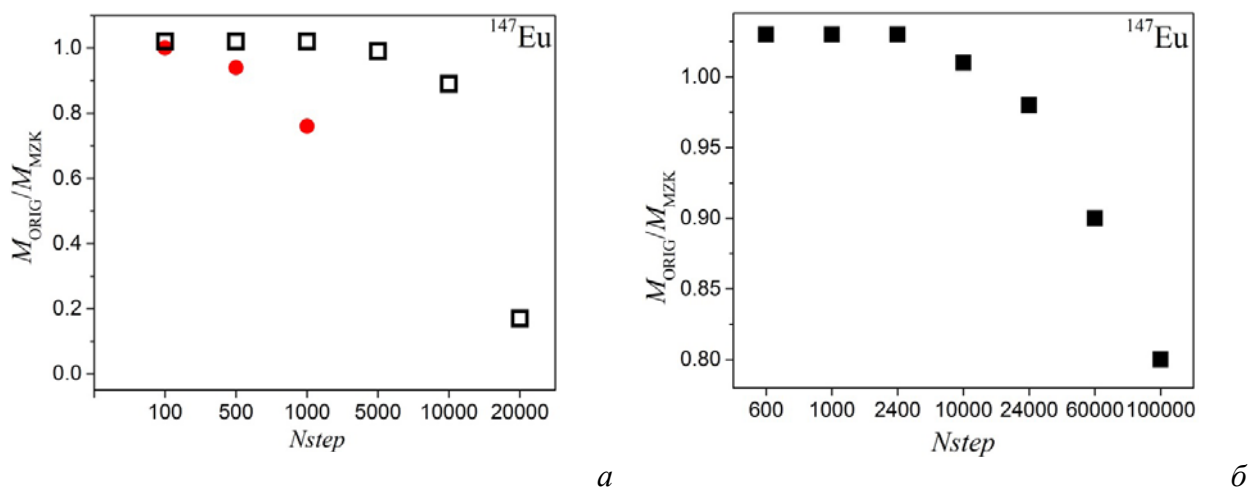


Рис.3 Динамика различий удельных концентраций ^{147}Eu для $T_{\text{обл}}$: 40 (●), 100 (□) и 600 (■) сут

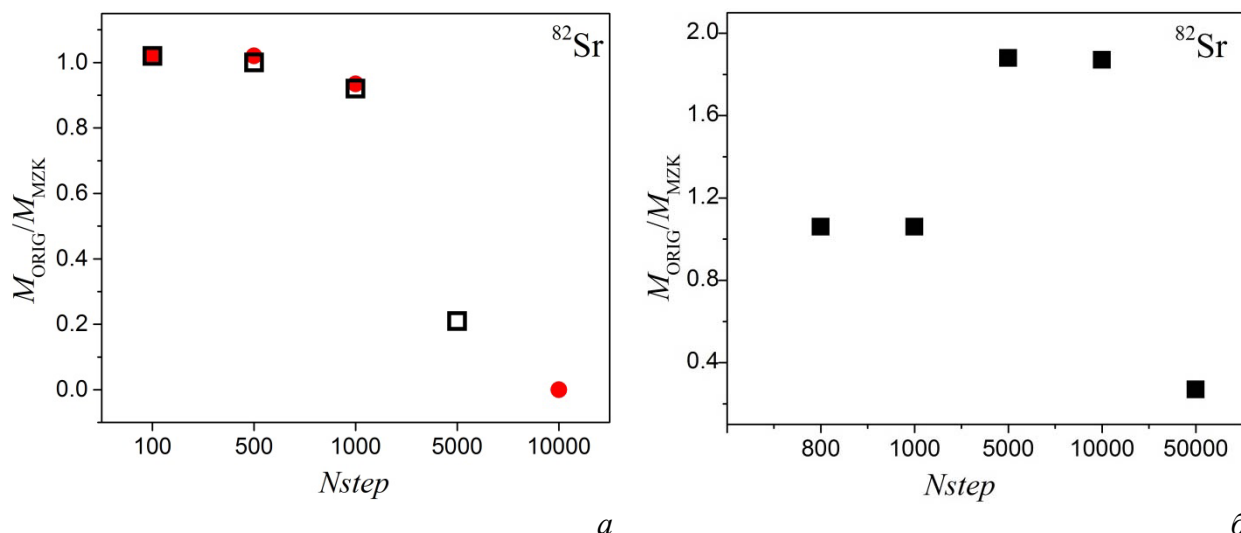


Рис.4 Динамика различных удельных концентраций ^{82}Sr для $T_{\text{обл}}$: 40 (●), 100 (□) и 1000 (■) сут

Полученные расхождения подтверждают невозможность получения корректных решений в расчетах по программе ORIGEN2 на любом отрезке временной шкалы, что обусловлено спецификой используемых в ORIGEN2 вычислительных методов и необходимостью выполнения определенных условий для «элементного равновесия» типа *приход–уход* на рассматриваемых временных шкалах. Важно отметить, что в программе ORIGEN2 используемые стандартные методы обеспечивают вычисление переменных ОДУ только в конечной точке интервала интегрирования. В то же время программа MZK позволяет рассчитывать траектории для всех отрезков временной шкалы для всех элементов системы ОДУ.

Заключение

Прецизионные расчеты при решении задач нуклидной кинетики с полным числом элементов выхода продуктов деления особенно актуальны при анализе ядерно-радиационной безопасности объектов с отработавшим ядерным топливом и новыми топливными композициями для разрабатываемых реакторов нового поколения. Объективная сложность получения экспериментальных данных по элементному составу облученного топлива требует при решении задач нуклидной кинетики применения вычислительных методов, обеспечивающих гарантированную погрешность результатов расчета.

В расчетах по программам ORIGEN2 и MZK получены согласованные значения для базовых нуклидов, традиционно используемых в реакторных задачах (актиниды, основные продукты деления для вычисления энергораспределения и некоторые другие). Расчеты по ORIGEN2 с расширенным базисом элементов выхода продуктов деления приводят к заметным различиям вычисляемых удельных концентраций для отдельных групп нуклидов, значения которых оказываются в непредсказуемой зависимости от параметров временной шкалы для заданного времени облучения. Кроме того, далеко не всегда в программе ORIGEN2 осуществляются корректные вычисления в «пограничной» области рассматриваемой временной шкалы, когда метод Гаусса-Зейделя с постоянным шагом интегрирования уже не работает, а экспоненциальный асимптотический метод не может обеспечить решение на указанном интервале.

В программе ORIGEN2 вычисляемые фактически с разными погрешностями для разных нуклидов удельные концентрации при невозможности обеспечения гарантированных погрешностей расчета определяют в качестве ключевой проблему обоснования достоверности получаемых решений и представляемых погрешностей.

Программа MZK, обеспечивая достоверные решения с гарантированной погрешностью для всех вычисляемых нуклидов, с полным основанием может рассматриваться в качестве реперной при решении задач нуклидной кинетики с полным числом элементов выхода продуктов деления.

Литература

1. Croff A. ORIGEN2: a versatile computer code for calculating the nuclide compositions and characteristics of nuclear materials. — Nucl. Technol., 1983, v. 62, p. 335–352.
2. Gene H. Golub, Charles F. Van Loan Matrix computations, 4-th Edition, 2013, 756 p.
3. Хайпер Э., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. М., «Мир», 1999, 645с.
4. Митенкова Е.Ф., Новиков Н.В., Соловьева Е.В. Библиотеки с расширенным представлением выхода продуктов деления в расчетах нуклидного состава топлива в быстром спектре — Атомная энергия, 2014. т. 117, вып. 6, с. 341–346.
5. E.F. Mitenkova, N.V. Novikov. “Effect of fission yield libraries on the irradiated fuel composition in Monte Carlo depletion calculations”. Proceedings of the 7-th Workshop Nuclear Measurements, Evaluations and Applications (NEMEA-7), 5–8 November 2013, Geel, Belgium, OECD 2014, p. 287–296.
6. E.F. Mitenkova, N.V. Novikov, G.I. Gadzhiev, V.N.Syuzuov “Studies of metal (U-Pu-Zr) fuel in BOR-60 reactor with focus on its use in high power sodium fast reactors”, In Proc. PHYSOR’2010, USA, May 9–14, 2010, CD-ROM № 700356.
7. Chadwick M., Herman M., Obložinský P., Dunn M. et al., ENDF/B-VII.1: Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data: Nucl. Data Sheets, 2011, vol. 112, issue 12, p. 2887–2996.
8. Митенкова Е.Ф., Новиков Н.В. Минимальная погрешность расчета накопления газообразных продуктов деления в металлическом топливе, облучаемом в быстром спектре — Сб. Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов, 2016, вып.1, с. 77–90.
9. Маничев В.Б., Жук Д.М. Базовый набор тестовых задач для решателей систем ОДУ. Технологии инженерных и информационных систем, 2016. т. 2, № 4, с. 70–84.
10. Маничев В.Б., Жук Д.М., Витюков Ф.Т. Достоверное и точное численное моделирование динамических систем при невысоких требованиях к математической точности конечных результатов — Информационные технологии, 2014, № 4, с. 27–33.
11. Митенкова Е.Ф., Соловьева Е. В., Маничев В.Б., Фельдман Э.О. Задачи изотопной кинетики на полном базисе элементов выхода продуктов деления. — Атомная энергия, 2018, т. 124, вып. 1, с. 54–57.
12. Shampine L.F., Reichelt M.W. The MATLAB ODE Suite — SIAM Journal on Scientific Computing, Vol. 18, 1997, p. 1–22.
13. Lawrence F. Shampine Solving $0 = F(t, y(t), y'(t))$ in MATLAB. — Journal of Numerical Mathematics, Vol.10, No.4, 2002, p. 291–310.
14. Соловьев А.В., Митенкова Е.Ф., Новиков Н.В., Соловьева Е.В. Решение задач изотопной кинетики с полным числом элементов выхода продуктов деления. — Атомная Энергия, 2016, т. 120, вып. 3, с. 165–170.
15. Жук Д.М., Кожевников Д.Ю., Маничев В.Б. Достоверность и точность решения систем ОДУ в среде моделирования разнородных динамических систем ПА10 (РА10) — Проблемы разработки перспективных микро - и нанoeлектронных систем, 2018, вып. 1, с. 97–102.