



А.А. Рыжков, Г.В. Тихомиров, М.Ю. Терновых

Результаты анализа чувствительности и неопределённости БНР в отношении ядерных данных

31.5.2024



Содержание

- Введение
- Модель и инструменты
- Подготовка ковариационных матриц
- Верификация моделей
- Чувствительность
- Неопределённость
- Заключение

Введение

Актуальность

- Интерес к Best Estimate Plus Uncertainty подходу
- Неопределённость — диапазон значений, которые может принимать параметр, в пределах заданного доверительного интервала
- Интерес к реакторам нового поколения (Поколение IV)

Сложности

- Ограниченная база для валидации
- Точно предсказать поведение реактора
- Отличная от ВВЭР физика (материалы, геометрия, температуры, топливо, спектр, и т.д.)
- Ограничения ядерных данных (основа моделирования переноса нейтронов!!!)
- Ограниченные данные свойства материалов

Анализ чувствительности и неопределённости

Проведение анализа чувствительности и неопределённости на основе теории возмущений:

- позволяет получить неопределённость выбранных функционалов (собственное значение, коэффициенты реактивности и др.)
- позволяет получить основные источники неопределённости
- позволяет оценить качество данных
- позволяет выявить данные, требующие внимания
- позволяет выявить недостающие данные
- позволяет верифицировать результат между кодами

Введение

Чувствительность и неопределённость

Относительная чувствительность функционала R к параметру α :

$$S(R, \alpha) \equiv \frac{\alpha}{R} \frac{dR}{d\alpha}$$

Теория возмущений первого порядка:

$$S(k, \alpha) = \frac{\alpha}{k} \frac{dk}{d\alpha} = -\alpha \frac{\left\langle \psi^*, \left(\frac{\partial \hat{A}}{\partial \alpha} - \frac{1}{k} \frac{\partial \hat{F}}{\partial \alpha} \right) \psi \right\rangle}{\left\langle \psi^*, \frac{1}{k} \hat{F} \psi \right\rangle} + \mathcal{O}(\delta\psi)$$

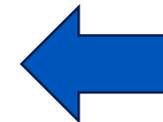
Относительная неопределённость:

$$\sigma^2(R) = \mathbf{S}(R, \alpha) \mathbf{C}_{\alpha\alpha} \mathbf{S}^T(R, \alpha)$$

Ковариационная матрица



Анализ чувствительности



Теория возмущений



Анализ неопределённости

Сравнение других результатов

Table 3. Major nuclide/reactions contributing up to 95% to the overall relative uncertainty in nominal k-eff and sodium void effects using SCALE6.1 covariance data.

Quantity	$\Delta k/k(\%)$		$\varepsilon_{\Delta\rho} (\%)$											
	NOMINAL		S1		S2		S3		S4		S5		S6	
	SCA LE	SER PENT	SCA LE	SER PENT	SCA LE	SER PENT	SCA LE	SER PENT	SCA LE	SER PENT	SCA LE	SER PENT	SCA LE	SER PENT
²³⁸ U elastic													0.93	
²³⁸ U inelastic	0.92	0.91	2.14	1.90	2.75	2.32	2.70	3.26	4.30	3.65	2.18	1.86	5.36	6.76
²³⁸ U elastic-inelastic ^b	0.21	0.21	0.84	0.37		-1.26			1.24	-1.78	0.83	-1.30	2.58	
²³⁸ U capture	0.27	0.27			1.92	1.56	1.46	1.20	1.37	1.26	0.36		3.37	3.27
²³⁸ U nubar			0.37									0.35		
²³⁸ Pu fission													2.09	
²³⁹ Pu elastic												0.36		
²³⁹ Pu elastic-inelastic												0.44		
²³⁹ Pu capture	0.25	0.25			1.23	1.01							2.12	
²³⁹ Pu fission					1.24	1.10	0.95		1.21	1.11		0.37		2.21
²³⁹ Pu nubar	0.66	0.67	0.79	0.81	2.32	2.09	1.36	1.22	1.96	1.85	0.80	0.86	3.95	4.21
²³⁹ Pu χ	0.29	^a	0.65	^a								0.52		
²⁴⁰ Pu nubar	0.21	0.21												
¹⁰ O elastic							0.98	1.18					0.47	
²³ Na elastic			1.30	1.21	2.67	2.30	2.28	1.98	2.22	2.33	1.33	1.39	3.35	3.20
²³ Na inelastic					3.99	3.55	2.26	2.25	3.73	3.77			6.18	6.60
²³ Na capture					1.07					1.09			1.81	
²³ Na elastic-inelastic					-1.68	-1.55	-0.90	-1.04		-1.59		-0.37	-1.38	
⁵⁶ Fe elastic			0.58	0.47							0.37	0.72		
TOTAL^c	1.26	1.22	2.97	2.47	6.41	5.33	4.75	4.71	6.79	5.89	2.89	2.55	11.02	11.52
OVERALL^d	1.318	1.28	3.06	2.61	6.69	5.58	4.94	4.92	7.04	6.16	3.03	2.68	11.50	12.10

Reaction	Uncertainty, $\Delta k/k$ [%]	
	TSUNAMI-3D (252 g)	Serpent (28 g)
²³ Na(<i>n, n'</i>)	6.71(-)	5.94(1)
²³⁸ U(<i>n, n'</i>)	6.07(2)	6.19(6)
²³ Na(<i>n, n</i>)	3.19(-)	2.98(5)
²³⁸ U(<i>n, γ</i>)	2.87(-)	2.92(1)
²³⁹ Pu(<i>n, f</i>)	2.20(-)	2.20(-)
Total listed	10.25(2)	9.85(8)
Total	10.92(3)	-

Инструменты

SCALE 6.2.4

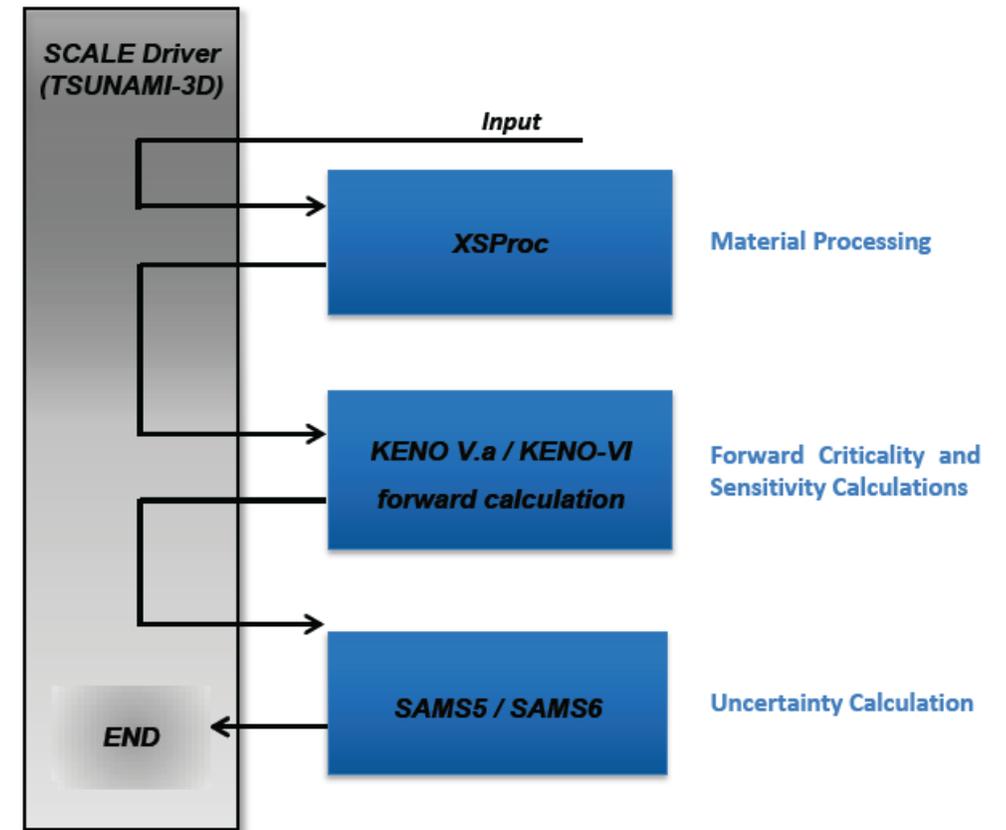
- Модуль TSUNAMI-3D, использующий стохастический код KENO-VI, рассчитывает чувствительности и неопределённости в автоматическом режиме
- Библиотеки: SCALE 6.2 (ENDF/B-VII.1) SCALE 6.3 (ENDF/B-VII.1)

Serpent

- Позволяет проводить расчёт чувствительностей
- Библиотеки: ENDF/B-VII.1
- Неопределённость рассчитывается только для COVERX

NJOY

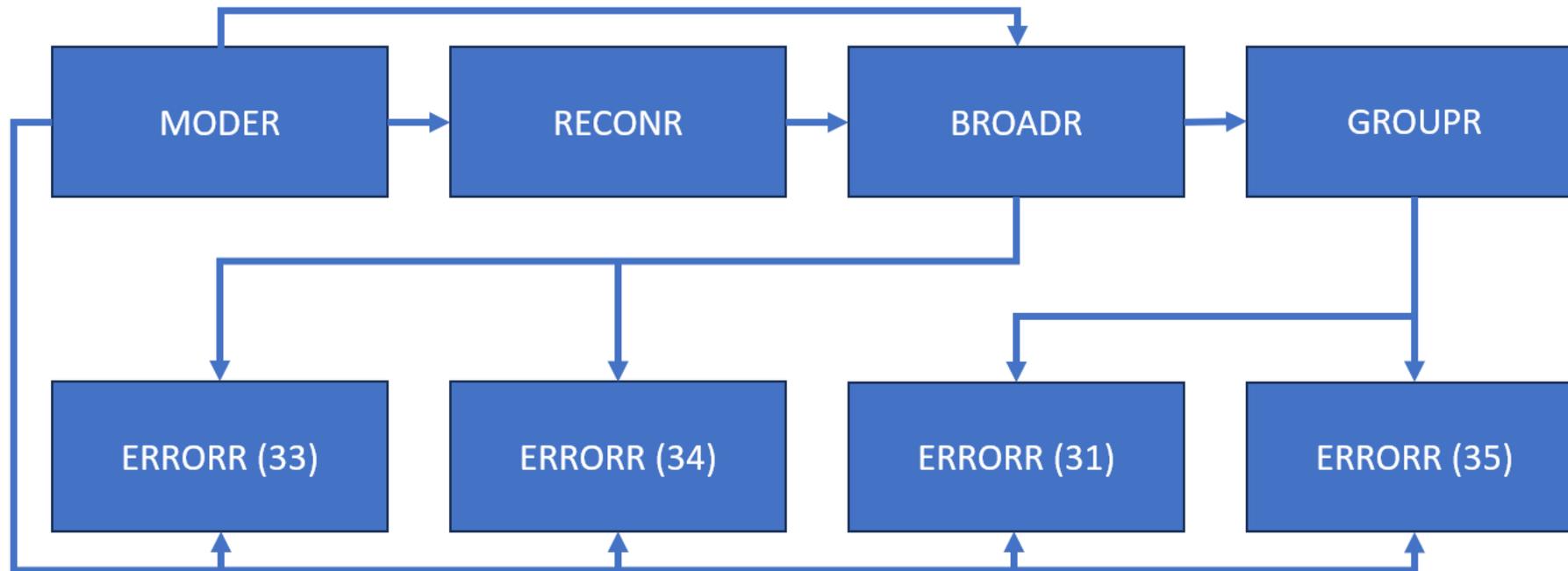
- Подготовка групповых ковариационных матриц для использования их с результатами Serpent



Цепочка SCALE/TSUNAMI-3D (CE)

Подготовка ковариационных данных

Схема подготовки ковариационных данных в NJOY



- Для ковариаций MF33 (MT2,4,16,18,102,103,104,105,106,107) и MF34 (MT251) подаётся лента PENDF
- Для ковариационных данных MF31 (MT452, 455, 456) и MF35 подаётся лента GENDF

Подготовка ковариационных данных

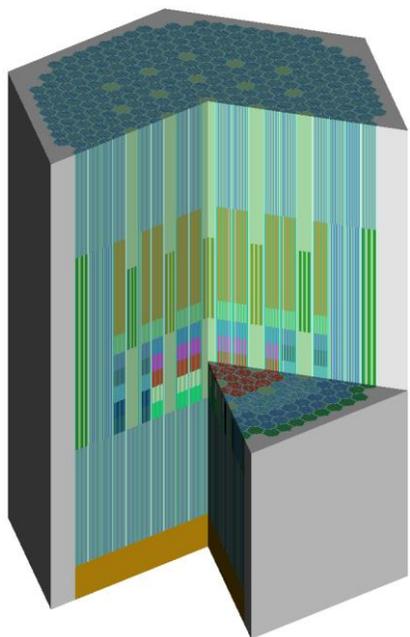
Предварительные результаты работы процессингового кода

Библиотека	Год	Число ENDF файлов	Число полученных матриц	Число изотопов с нефизическими матрицами
ENDF/B-VII.1	2011	423	1460	7 (^{232}Th , $^{242-246}\text{Cm}$, ^{248}Cm)
БРОНД-3.1	2016	372	1140	0
JEFF-3.3	2017	562	7793	2 (^{232}Th , ^{243}Am)
ENDF/B-VIII.0	2018	557	2135	7 (^{232}Th , $^{242-246}\text{Cm}$, ^{248}Cm)
CENDL-3.2	2020	272	1178	0
JENDL-5	2021	795	1234	9 (^{241}Am , $^{242\text{m}}\text{Am}$, ^{243}Am , $^{242-246}\text{Cm}$, ^{248}Cm)
TENDL-2021	2021	2813	59784	1 (^{232}Th)
JEFF-4T2.2	2023	564	9697	4 (^{171}Tm , ^{232}Th , $^{242\text{m}}\text{Am}$, ^{243}Am)
JEFF-4T3	2024	562	1460	4 (^{171}Tm , ^{232}Th , $^{242\text{m}}\text{Am}$, ^{243}Am)

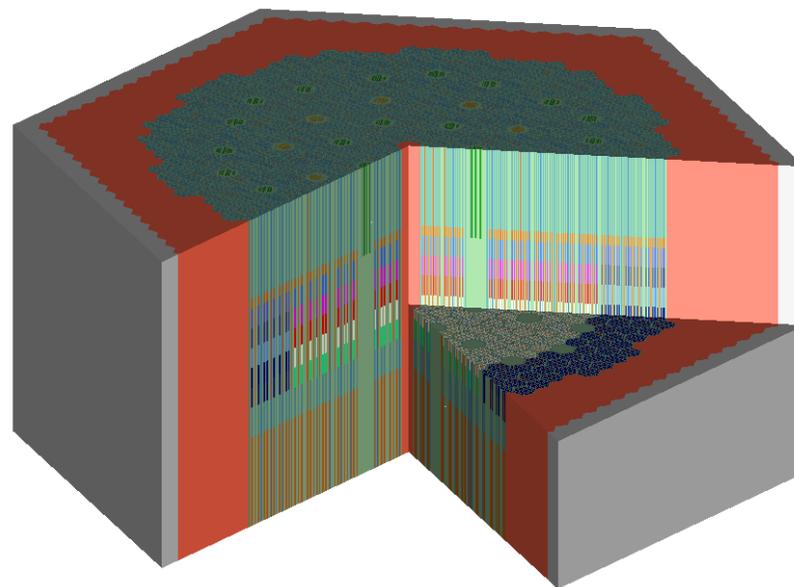
Модели

Расчётные модели

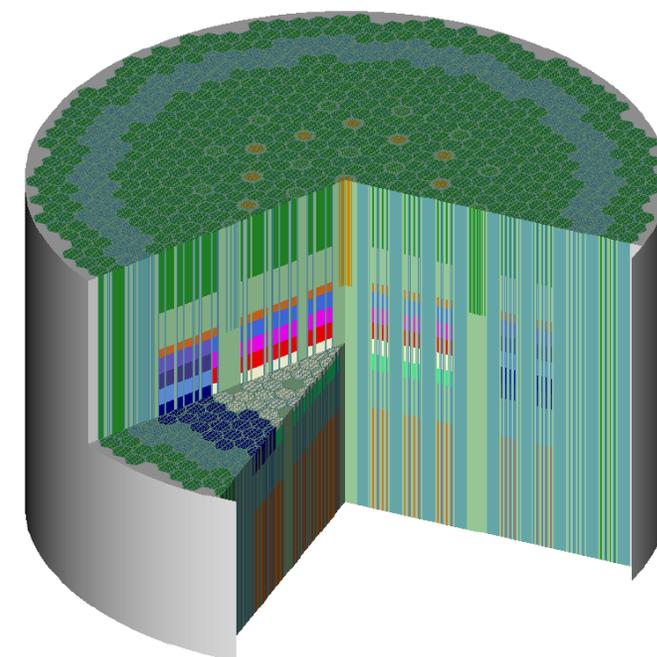
МЕТ1000 – БНР с металлическим топливом, МОХ3600 – БНР с МОХ топливом, БН-1200 – БНР со СМУП топливом



МЕТ1000



МОХ3600



БН1200

Верификация

Сравнение собственных значений между кодами

Результат	МЕТ1000	МОХ3600	БН-1200
KENO-VI (SCALE 6.3, ENDF/B-VII.1)*	1,01658(6)	1,01141(5)	1,00014(5)
Serpent (ENDF/B-VII.1)	1,01667(2)	1,01128(2)	1,00053(2)
KENO-VI (SCALE 6.2, ENDF/B-VII.1)	1,01959(5)	1,01636(5)	-
$\Delta\rho$ [pcm]	9(6)	-13(5)	39(5)

В скобках представлена статистическая неопределённость для доверительного интервала 68%

Погрешность SCALE 6.2 (ENDF/B-VII.1) относительно других библиотек:

- может составлять ~500 pcm для БНР
- составляет ~1500 pcm ЖСР с TRU+²³²Th
- составляет ~1000 pcm ЖСР с ²³³U+²³²Th

*ORNL выложил библиотеки SCALE 6.3 в открытый доступ

Чувствительность

Чувствительность собственного значения в METPOO

Реакция	SCALE	Serpent
$^{239}\text{Pu}(n, f)$	0,466	0,469
$^{238}\text{U}(n, \gamma)$	-0,143	-0,151
$^{238}\text{U}(n, f)$	0,066	0,069
$^{240}\text{Pu}(n, f)$	0,065	0,064
$^{238}\text{U}(n, n')$	-0,064	-0,064
$^{241}\text{Pu}(n, f)$	0,058	0,057
$^{239}\text{Pu}(n, \gamma)$	-0,030	-0,027

Чувствительность

Чувствительность собственного значения в MOX3600

Источник	SCALE	Serpent
$^{239}\text{Pu}(n, f)$	0,485	0,487
$^{238}\text{U}(n, \gamma)$	-0,211	-0,210
$^{238}\text{U}(n, f)$	0,077	0,077
$^{238}\text{U}(n, n')$	-0,076	-0,074
$^{241}\text{Pu}(n, f)$	0,071	0,071
$^{16}\text{O}(n, n)$	-0,064	-0,061
$^{240}\text{Pu}(n, f)$	0,052	0,044

Чувствительность

Чувствительность собственного значения в БН-1200

Источник	SCALE	Serpent
$^{239}\text{Pu}(n, f)$	0,512	0,512
$^{238}\text{U}(n, \gamma)$	-0,210	-0,210
$^{238}\text{U}(n, f)$	0,089	0,089
$^{238}\text{U}(n, n')$	-0,082	-0,080
$^{240}\text{Pu}(n, f)$	0,049	0,049
$^{239}\text{Pu}(n, \gamma)$	-0,043	-0,043
$^{241}\text{Pu}(n, f)$	0,037	0,036

Неопределённость

Источники неопределённости собственного значения МЕТ1000

Источник	SCALE (252 группы)	Serpent (28 групп)
$^{238}\text{U}(n, n')$	0,95%	0,94%
$^{238}\text{U}(n, n) - ^{238}\text{U}(n, n')$	0,20%	0,19%
$^{239}\text{Pu}(n, f)$	0,20%	0,20%
$^{56}\text{Fe}(n, n')$	0,19%	0,20%
$^{239}\text{Pu}(\chi)$	0,19%	0,18%
Сумма	1,02%	1,02%
Полная неопределённость	1,15%	1,13%

Неопределённость

Источники неопределённости собственного значения MOX3600

Источник	SCALE (252 группы)	Serpent (28 групп)
$^{238}\text{U}(n, n')$	1,18%	1,15%
$^{238}\text{U}(n, \gamma)$	0,27%	0,29%
$^{239}\text{Pu}(n, \gamma)$	0,23%	0,22%
$^{239}\text{Pu}(\chi)$	0,21%	0,19%
$^{239}\text{Pu}(n, f)$	0,20%	0,20%
Сумма	1,27%	1,24%
Полная неопределённость	1,36%	1,33%

Неопределённость

Источники неопределённости собственного значения БН-1200

Источник	SCALE (252 группы)	Serpent (28 групп)
$^{238}\text{U}(n, n')$	1,20%	1,18%
$^{238}\text{U}(n, \gamma)$	0,27%	0,26%
$^{239}\text{Pu}(n, f)$	0,21%	0,21%
$^{239}\text{Pu}(\chi)$	0,21%	0,21%
$^{239}\text{Pu}(n, \gamma)$	0,20%	0,21%
Сумма	1,28%	1,24%
Полная неопределённость	1,37%	1,34%

Оценка схожести моделей

Коэффициент корреляции c_k

$$c_k = \frac{S_1 C_{\alpha\alpha} S_2^T}{\sqrt{(S_1 C_{\alpha\alpha} S_1^T)(S_2 C_{\alpha\alpha} S_2^T)}}$$

Модель	МЕТ1000	МОХ3600	БН-1200
МЕТ1000	1	0,971	0,973
МОХ3600	0,971	1	0,986
БН-1200	0,973	0,986	1
EBR-II*	0,040	0,016	0,029
GFR2400*	0,929	0,968	0,971

*Для сравнения

Неопределённость

Предварительные результаты оценки неопределённости собственного значения для различных библиотек

Библиотека	МЕТ1000	МОХ3600	БН-1200
ENDF/B-VII.1	1,15%	1,33%	1,34%
БРОНД-3.1	-	-	-
JEFF-3.3	0,99%	0,99%	0,97%
ENDF/B-VIII.0	-	-	-
CENDL-3.2	-	-	-
JENDL-5	0,91%	0,97%	0,96%
TENDL-2021	11,81%	13,71%	7,20%
JEFF-4T2.2	-	-	-

Множество нуклидов, которые обрабатываются в случае ENDF/B-VII.1, не могут быть обработаны

Заключение

- Проведён анализ чувствительности и неопределённости в отношении ядерных данных
- Неопределённость собственного значения k составляет 1,15% (МЕТ1000), 1,36% (МОХ3600) и 1,37% (БН-1200)
- Неопределённость собственного значения, полученного в TSUNAMI-3D, верифицирована в Serpent
- Показано расхождение для сечений рассеяния
- Требуется рассмотрение опустошённой модели активной зоны и модель с другими параметрами Serpent
- Показана заметная схожесть моделей коэффициентом корреляции $>0,97$
- Необходимо выявить причину не обработки данных

Список литературы

1. NEA. Benchmark for Neutronic Analysis of Sodium-cooled Fast Reactor Cores with Various Fuel Types and Core Sizes / NEA. – OECD Publishing, Paris, 2015.
2. Vasiliev, B.A., Belov, S.B., Kiselev, A.V., Eliseev, V.A., Khomiakov, Iu.S., Rodina, E.A., 2021. Unification of the BN-1200 reactor core designs with MOX and MNUP fuel. Nuclear Engineering and Design 382, 111387. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111387>
3. SCALE Code System, ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.4, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, US. Available from Radiation Safety Information Computational Center as CCC-834. / W.A. Wieselquist [et al.]. – 2020.
4. The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013 / J. Leppänen [et al.] // Annals of Nuclear Energy. – 2015. – Vol. 82. – The Serpent Monte Carlo code. – P. 142-150.
5. The NJOY Nuclear Data Processing System, Version 2016 / R. MacFarlane [et al.]. – Los Alamos National Laboratory, 2016.
6. Manturov G.N. BNAB-93 Group Data Library. Part 1: Nuclear Data for the Calculation of Neutron and Photon Radiation Fields / G.N. Manturov, M.N. Nikolaev, A.M. Tsibulya // Nuclear Constants. – 1996.
7. García-Herranz, N., Panadero, A.-L., Martinez, A., Pelloni, S., Mikityuk, K., Pautz, A., 2017. Nuclear data sensitivity and uncertainty assessment of sodium voiding reactivity coefficients of an ASTRID-like sodium fast reactor. EPJ Web Conf. 146, 09006. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714609006>
8. Ryzhkov, A.A., Tikhomirov, G.V., Ternovykh, M.Yu., 2024. Angular distribution uncertainty influence in a large sodium-cooled fast reactor with mixed-oxide fuel. Annals of Nuclear Energy 197, 110248. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2023.110248>
9. Bostelmann, F., Ilas, G., Celik, C., Holcomb, A.M., Wieselquist, W.A., 2021. Nuclear Data Assessment for Advanced Reactors (No. ORNL/TM-2021/2002). Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, US.

Спасибо за внимание!

