

---

**ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ**

---

УДК 621.039.52

EDN: YQPN1Y

**О ВАЛИДАЦИОННОЙ ОЦЕНКЕ МОДЕЛЬНЫХ ПОДХОДОВ  
К ОПИСАНИЮ ДИНАМИКИ ЯРУ****Д.Е. Богомолов**

ORCID: 0009-0007-8405-344X e-mail: bogomolov\_de@okbm.nnov.ru

ОКБМ «Африкантов»  
Нижний Новгород, Россия**Д.Г. Кресов**

ORCID: 0009-0002-6169-7801 e-mail: dkresov@okbm.nnov.ru

ОКБМ «Африкантов»  
Нижний Новгород, Россия**С.С. Григорьев**

ORCID: 0009-0002-2206-7196 e-mail: grigorev\_ss@okbm.nnov.ru

ОКБМ «Африкантов»  
Нижний Новгород, Россия**Е.В. Оленская**

ORCID: 0009-0001-8366-9740 e-mail: olenskaya\_ev@okbm.nnov.ru

ОКБМ «Африкантов»  
Нижний Новгород, Россия

Решена задача выбора оптимальной модели динамики реакторной установки по критерию минимального отклонения расчетных значений параметров реактора от экспериментально полученных данных. При необходимости валидации моделей на группе режимов по нескольким параметрам задача приобретает многокритериальный характер. Для решения применены методы поддержки принятия решений *SAW*, *TOPSIS* и *ELECTRE*. Методом *SAW* проведен анализ чувствительности результатов к экспериментальным погрешностям измерений и к варьируемой значимости валидируемых параметров реакторной установки. Результаты позволяют ограничить исходный набор моделей для последующего уточнения рассматриваемых физических предпосылок.

**Ключевые слова:** валидация, кинетика, модель динамики реакторной установки, многокритериальный анализ, коэффициент важности, *SAW*, *TOPSIS*, *ELECTRE*, анализ чувствительности.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Богомолов, Д.Е. О валидационной оценке модельных подходов к описанию динамики ЯРУ / Д.Е. Богомолов, Д.Г. Кресов, С.С. Григорьев, Е.В. Оленская // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 2. С. 59-68. EDN: YQPN1Y

**ON THE VALIDATION ASSESSMENT OF MODEL APPROACHES  
TO DESCRIPTION OF NUCLEAR REACTOR PLANT DYNAMIC****D.E. Bogomolov**

ORCID: 0009-0007-8405-344X e-mail: bogomolov\_de@okbm.nnov.ru

«Afrikantov» Joint Stock Company  
Nizhny Novgorod, Russia

**D.G. Kresov**

ORCID: **0009-0002-6169-7801** e-mail: **dkresov@okbm.nnov.ru**

«Afrikantov» Joint Stock Company  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**S.S. Grigoryev**

ORCID: **0009-0002-2206-7196** e-mail: **grigorev\_ss@okbm.nnov.ru**

«Afrikantov» Joint Stock Company  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**E.V. Olenskaya**

ORCID: **0009-0001-8366-9740** e-mail: **olenskaya\_ev@okbm.nnov.ru**

«Afrikantov» Joint Stock Company  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The paper presents a solution to the problem of selecting an optimal model of the reactor plant dynamics according to the criterion of the minimum deviation of the calculated and experimentally obtained data of reactor parameters. This problem becomes multi-criteria in case of validation models on a group of modes with different parameters. SAW, TOPSIS and ELECTRE methods of decision support are used for the solution. The sensitivity analysis of the results to experimental measurement errors and to the varying significance of the validated reactor plant parameters was carried out by SAW methods. According to the authors, these results make it possible to limit the initial set of models for the subsequent refinement of the physical assumptions under consideration.

**Key words:** validation, kinetics, reactor plant dynamic model, multi-criteria analysis, importance factor, SAW, TOPSIS, ELECTRE, sensitivity analysis.

**FOR CITATION:** D.E. Bogomolov, D.G. Kresov, S.S. Grigoryev, E.V. Olenskaya. On the validation assessment of model approaches to the description of the nuclear reactor plant dynamic. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 2. Pp. 59-68. EDN: YQPNIY

## Введение

При анализе переходных процессов в ядерной реакторной установке (ЯРУ) исходными данными для динамических кодов служат, в том числе, результаты статических нейтронно-физических расчетов. При этом в расчетной практике широкого использования инженерных кодов в приближении точечного описания нейтронной кинетики сохраняется ряд неопределенностей в описании реактивных эффектов. К таким неопределенностям можно отнести степенную зависимость эффективного коэффициента размножения (или реактивности) от нейтронного поля, а для водо-водяных реакторов с канальной компоновкой активной зоны – вклады в Т-эффект канального и межканального теплоносителей. При углубленных исследовательских проработках одного из проектов транспортной ЯРУ указанные вклады по результатам стационарных нейтронно-физических расчетов для начала кампании были оценены в соотношениях 50 / 50 % в диффузионном приближении и 80 / 20 % при использовании статистического метода Монте-Карло соответственно для канального и межканального теплоносителей. Определение зависимости реактивности  $\rho$  от коэффициента объемной неравномерности нейтронного поля ( $\rho = f[K_V^X]$ ) также представляет собой нетривиальную задачу [1] с учетом нахождения показателя  $\chi$  в теоретически возможном диапазоне от 0 до 2.

С целью оценки чувствительности результатов расчета динамики по модели точечной кинетики к указанным неопределенностям была проведена серия расчетов пяти режимов с пусками ГЦН, характеризующимися наиболее значительными (среди режимов нормальной эксплуатации) возмущениями реактивности:

- 1) запуск исходно остановленного ГЦН на малую скорость (МС);
- 2) перевод единственного работающего на МС ГЦН на большую скорость (БС);
- 3) перевод одного из исходно работающих на МС ГЦН на большую скорость;

4) последовательный с интервалом 30 с перевод двух исходно работающих на МС ГЦН на БС;

5) последовательный с интервалом 30 с запуск двух исходно остановленных ГЦН на МС.

Расчеты были проведены для следующих моделей представления реактивности: «50/50; 0», «50/50; 2», «80/20; 0», «80/20; 2», где отношение отражает вклад в Т-эффект канального и межканального теплоносителя, а цифра – показатель степени  $\chi$ . Каждая из указанных моделей была соотнесена с экспериментальными результатами. Расчеты динамики выполнялись по аттестованному в НТЦ ЯРБ инженерному коду *ЕСКМ-3Д* [2, 3]. В качестве оцениваемых величин были выбраны значения измеренных мощности и давления в первом контуре (в качестве характеристики интеграла выделившейся в теплоносителе энергии). При моделировании системы управления инерционность измерений мощности принималась равной 0,5 с, а показания давления рассчитывались с учетом места расположения манометра на газовой трассе системы компенсации давления. Экспериментальная погрешность измерений мощности  $\pm 2,5\% N_{\text{ном}}$ , давления первого контура  $\pm 3,2\% P_{\text{ном}}$ .

Примеры динамики отклонений моделируемой измеренной мощности от экспериментальных значений представлены на рис. 1-3. Визуальная оценка отклонений не позволяет выделить ни одну из моделей, которая бы наилучшим образом совпадала с экспериментом. При этом указанная трудность реализуется как для любого из режимов, так и для всей рассматриваемой совокупности процессов. Поэтому выбор требует поиска специальных методов оценки. В качестве таковых в настоящей работе рассматриваются три известных алгоритма многокритериального анализа, применяемых при решении инженерных и технико-экономических вопросов [4, 5], а также в анализе расчетных нейтронно-физических моделей [6].

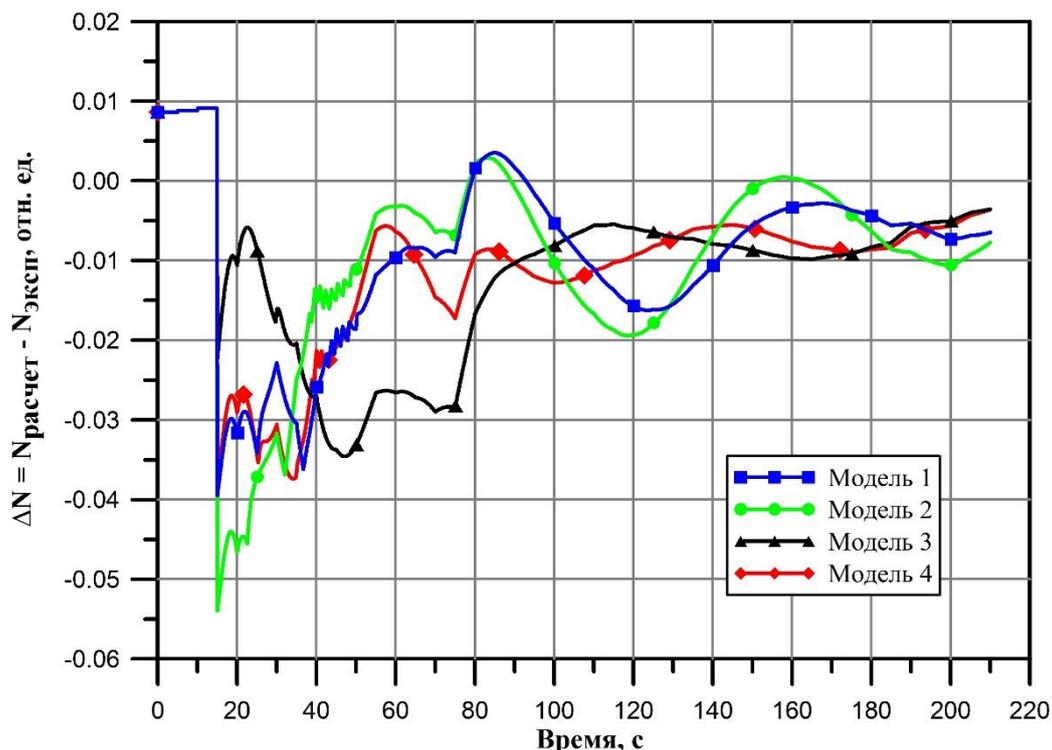


Рис. 1. Отклонения расчетных от экспериментальных значений мощности для режима 1

Fig. 1. Deviations between calculated and experimental values of power for mode 1

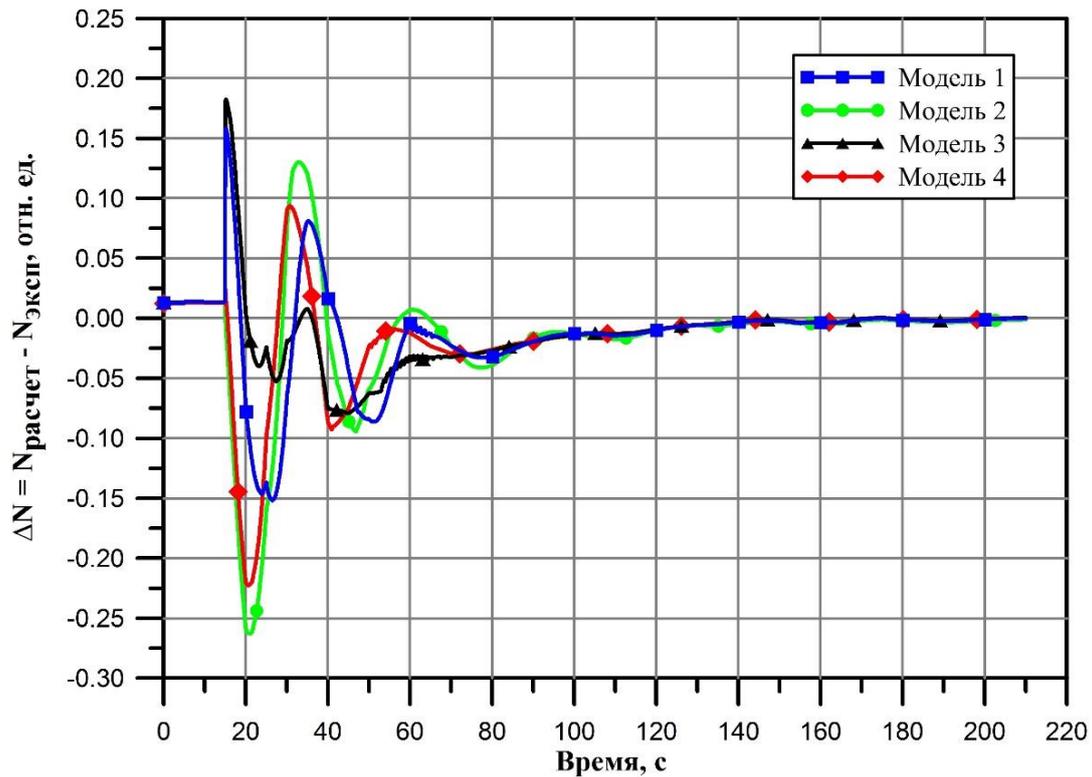


Рис. 2. Отклонения расчетных от экспериментальных значений мощности для режима 3

Fig. 2. Deviations between calculated and experimental values of power for mode 3

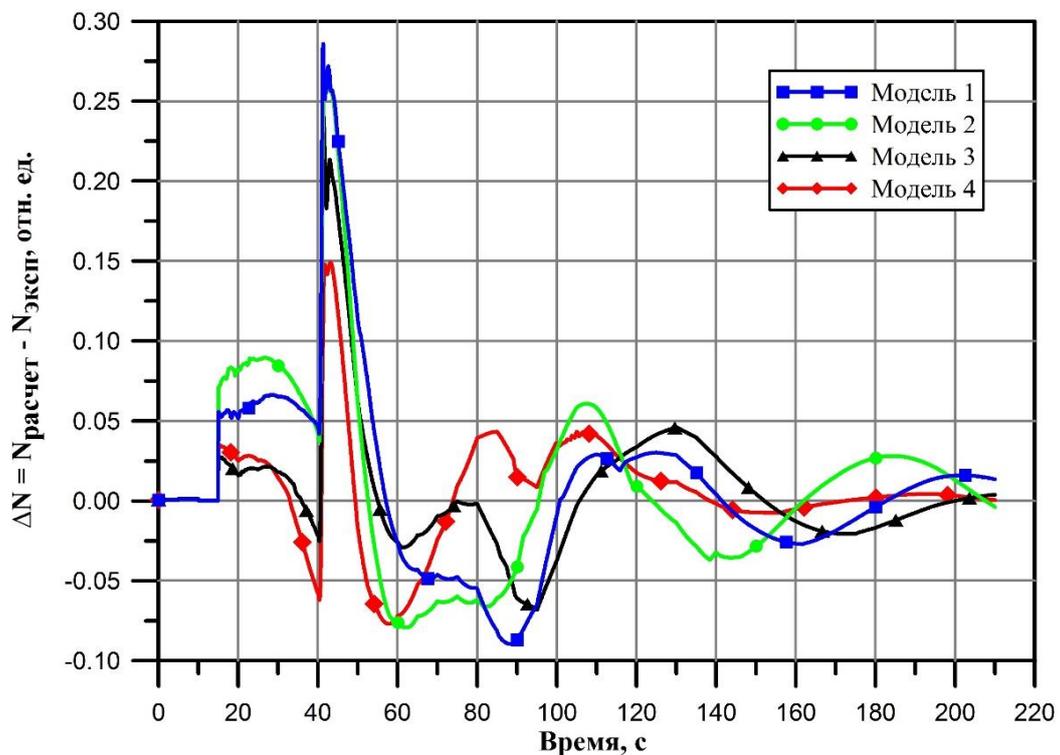


Рис. 3. Отклонения расчетных от экспериментальных значений мощности для режима 5

Fig. 3. Deviations between calculated and experimental values of power for mode 5

## Методы многокритериального анализа

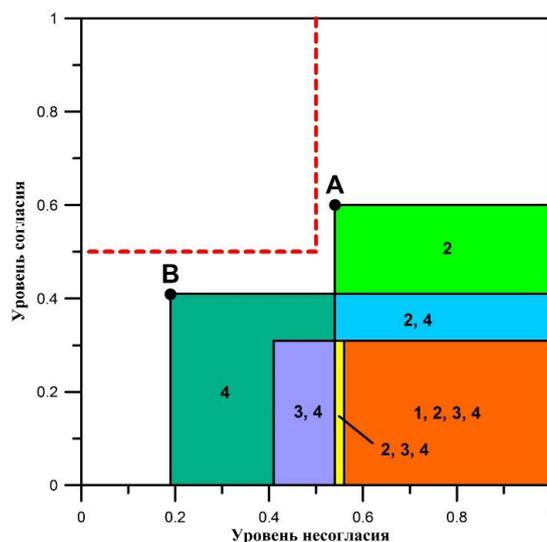
Для решения многокритериальной задачи выбраны широко известные и применяемые методы *SAW* [7], *TOPSIS* [8], *ELECTRE* [9, 10]. Многокритериальные методы принятия решений подобные используемым в настоящей работе хорошо показывают себя в задачах малой и средней сложности [10].

Метод *SAW* (*Simple Additive Weighting*) широко распространенный метод принятия решений в условиях многокритериальной задачи требующей ранжирования альтернатив. Основан на определении взвешенной суммы критериев. Выбор расчетной модели проводился по критерию максимальной разности между максимальным и анализируемым отклонением расчетных данных от экспериментальных значений параметров.

Метод *TOPSIS* (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) основан на определении решения максимально приближенного к «идеальному» состоянию и максимально отдаленного от «антиидеального» (или «идеально-негативного»). Конечным критерием, по которому производится ранжирование, в методе *TOPSIS* выступает относительная близость к «идеальному» состоянию.

Метод *ELECTRE* (*ELimination Et Choix Traduisant la REalite*) основан на использовании чувствительных показателей сравнимости – индексов согласия и несогласия. Индекс согласия рассчитывается на основе выполнения выдвигаемой гипотезы превосходства одной модели над другой. Индекс несогласия рассчитывается по наиболее противоречащему гипотезе критерию. Решение по методу *ELECTRE* определяется путем сравнения выбранных уровней согласия и несогласия с соответствующими им индексами. Уровни согласия и несогласия в общем случае выбираются лицом, принимающим решение. При этом разрешающее правило имеет вид бинарного соотношения, для которого индекс согласия не меньше уровня согласия, а индекс несогласия не больше выбранного уровня несогласия.

Пример решения бинарного соотношения с двумя несравнимыми между собой моделями (в примере это модели 2 и 4) представлен на рис. 4. Имеется два характерных решения бинарного соотношения – точки *A* и *B*. Первая характеризуется максимальным уровнем согласия, вторая – минимальным уровнем несогласия соответственно.



**Рис. 4. Решение бинарного соотношения метода ELECTRE**  
 1, 2, 3, 4 – номера расчетных моделей; *A* – максимизация уровня согласия;  
*B* – минимизация уровня несогласия

**Fig. 4. Solution of binary relation of ELECTRE method**  
 1, 2, 3, 4 – design models numbers; *A* – agreement level maximization;  
*B* – unconformity level minimization

## Оценка расчетных моделей по отклонению расчетов от эксперимента

Экспериментальные и расчетные значения мощности и давления были предварительно нормализованы на их величину в номинальном режиме работы ЯРУ. Исходные данные для многокритериального анализа были представлены в виде массивов отклонений расчетных значений от экспериментальных данных для каждого момента записи в расчете, экспериментальные данные были аппроксимированы под соответствующий расчетному временной шаг. Далее формировались количественные «оценки» расчетных моделей путем арифметического усреднения полученных на предыдущем шаге массивов величин отклонений, взятых по модулю. В результате было получено по 10 «оценок» для каждой модели (табл. 1) – усредненные соответствующим образом отклонения параметров мощности и давления первого контура для каждого рассмотренного режима. Соответственно первые пять «оценок» – это отклонения значений мощности ( $\Delta N$ ), «оценки» с 6 по 10 – отклонения значений давления ( $\Delta P$ ). Следующий шаг после оценки моделей – определение количественных коэффициентов важности [11] (или весовых коэффициентов) критериев оценки. Коэффициент важности – величина, которая показывает степень приоритетности одного показателя (или критерия) задачи принятия решений перед другим [11, 12]. Сумма коэффициентов важности равна единице. Определение коэффициентов важности критериев само по себе является нетривиальной задачей. Методы решения этой задачи составляют теорию важности критериев [11].

Для первого приближения в настоящей работе коэффициенты важности каждого критерия оценки приняты равными друг другу и численно равны 0,1 отн. ед.

**Таблица 1.**  
«Оценка» расчетных моделей

**Table 1.**  
«Evaluation» of design models

«Оцениваемый» параметр/номер режима ЯРУ	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4
$\Delta N/1$	0,0114	0,0117	0,0128	0,0123
$\Delta N/2$	0,0462	0,0458	0,0464	0,0471
$\Delta N/3$	0,2387	0,2409	0,2385	0,2394
$\Delta N/4$	0,1154	0,1152	0,1175	0,1173
$\Delta N/5$	0,0418	0,0449	0,0265	0,0207
$\Delta P/1$	0,0037	0,0036	0,0016	0,0023
$\Delta P/2$	0,0085	0,0074	0,0113	0,0086
$\Delta P/3$	0,0197	0,0131	0,0224	0,0164
$\Delta P/4$	0,0225	0,0213	0,0275	0,0233
$\Delta P/5$	0,0507	0,0490	0,0427	0,0374

## Результаты ранжирования моделей

В табл. 2 приведены результаты ранжирования расчетных моделей.

**Таблица 2.**  
Результаты ранжирования расчетных моделей

**Table 2.**  
Ranking results of design models

Ранг	Методы		
	SAW	TOPSIS	ELECTRE (A/B)*
1	Модель 4	Модель 4	Модель 2 / Модель 4
2	Модель 2	Модель 3	Модель 4 / Модель 3

Окончание табл. 2.  
Результаты ранжирования расчетных моделей

Table 2 continued.  
Ranking results of design models

Ранг	Методы		
	SAW	TOPSIS	ELECTRE (A/B)*
3	Модель 3	Модель 2	Модели 1 и 3 / Модель 2
4	Модель 1	Модель 1	– / Модель 1
* «А» и «В» аналогично обозначениям рис. 4 («А» характеризуется максимальным уровнем согласия, «В» характеризуется минимальным уровнем несогласия)			

Учет влияния погрешностей измерения параметров мощности реактора и давления первого контура проводился в формате многовариантного анализа с применением метода SAW. В каждом варианте значения экспериментальные данных либо смещались с определенным знаком на величину погрешности соответствующего параметра, либо сохранялись в номинальном состоянии. Причем вариант, в котором значения мощности и давления сохранены в номинальном состоянии, соответствует результатам, приведенным в табл. 2.

В качестве вариантов рассматривались следующие комбинации:

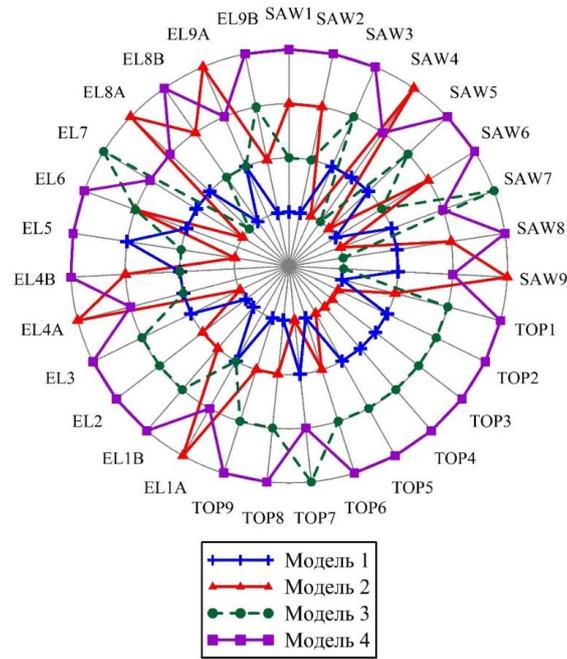
- 1) мощность и давление учтены без смещения на величину погрешности (номинальный случай);
- 2) и мощность, и давление смещены вверх («в плюс») на величину погрешности;
- 3) и мощность, и давление смещены вниз («в минус») на величину погрешности;
- 4) давление смещено вверх на величину погрешности, мощность без смещения;
- 5) давление смещено вниз на величину погрешности, мощность без смещения;
- 6) мощность смещена вверх на величину погрешности, давление без смещения;
- 7) мощность смещена вверх на величину погрешности, давление смещено вниз на величину погрешности;
- 8) мощность смещена вниз на величину погрешности, давление без смещения;
- 9) мощность смещена вниз на величину погрешности, давление смещено вверх на величину погрешности.

По итогам многовариантного анализа с применением многокритериальных методов сформирована лепестковая диаграмма (рис. 5), на которой отражены ранги расчетных моделей для каждого варианта по каждому используемому методу многокритериального анализа. Внешняя окружность диаграммы соответствует первому (лучшему) рангу. Из диаграммы видно, что модель 4 наиболее стабильна в качестве наиболее предпочтительной – не опускается ниже второго ранга. Модель 1, в свою очередь, показывает наихудшие результаты.

### Чувствительность решения к значениям коэффициентов важности

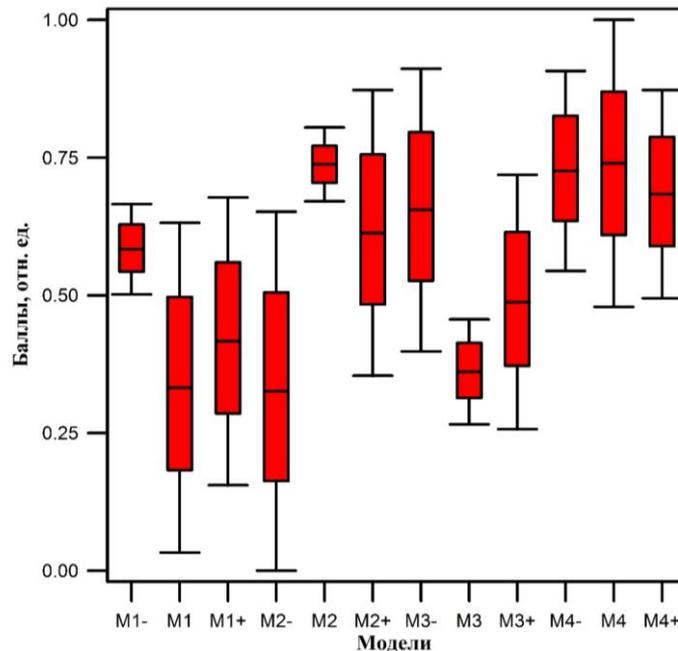
Для вышеописанной задачи критерии сравнения альтернативных моделей (критерии оценки) принимались равными друг другу. Однако при замене оцениваемых параметров и (или) при увеличении их количества может возникнуть необходимость решения задачи определения коэффициентов важности (весовых коэффициентов) для каждого критерия. При этом значительное изменение упомянутых коэффициентов может привести к иным результатам многокритериального анализа.

В рамках настоящей работы был проведен анализ чувствительности результатов многокритериального анализа к значениям коэффициентов важности критериев оценки, относящихся к параметрам мощности и давления первого контура. Для случая с двумя параметрами осуществлялся дискретный анализ по всему диапазону возможных значений коэффициентов важности, например, для обобщенного критерия по мощности в диапазоне от 0 до 1 с шагом, равным 0,025.



**Рис. 5. Результаты ранжирования с учетом влияния погрешностей**  
 номера 1-9 – варианты учета влияния погрешностей; маркер «А» – максимизация уровня согласия (для ELECTRE); маркер «В» – минимизация уровня несогласия (для ELECTRE)

**Fig. 5. Ranking results taking into account the influence of errors**  
 numbers 1-9 – options for taking into account the effect of errors; marker «A» – agreement level maximization (for ELECTRE); marker «B» – unconformity level minimization (for ELECTRE)



**Рис. 6. Результаты анализа чувствительности решения многокритериальной задачи к коэффициенту важности:**

*M1, M2, M3, M4 – соответствующие расчетные модели;*

*знак «-» – вариант с значениями параметров отклоненными вниз на величину погрешности; знак «+» – вариант с значениями параметров отклоненными вверх на величину погрешности*

**Fig. 6. Sensitivity analysis of multi-criteria problem solution in accordance with importance factor:**  
*M1, M2, M3, M4 – corresponding design models; sign «-» – option with parameter values deviated downward by the amount of error; sign «+» – option with parameter values deviated upward by the amount of error*

В рамках данного анализа чувствительности были рассмотрены три варианта для каждой расчетной модели: мощность и давление учтены без отклонения (номинальный случай); и мощность, и давление отклонены вверх на величину погрешности; и мощность, и давление отклонены вниз на величину погрешности. Результаты анализа приведены на рис. 6 в виде диаграммы размаха по аналогии с [6]. По результатам варьирования коэффициентов превосходства в паре исследуемых параметров можно говорить о заметном влиянии значений этих коэффициентов на результат решения многокритериальной задачи. Стоит заметить, что модель 4 в отличие от остальных находится в верхней половине диаграммы (рис. 6) как в номинальном расчете, так и с учетом влияния погрешностей.

В ходе анализа чувствительности также были выявлены следующие тенденции:

- 1) при смещении веса в сторону большей важности мощности начинает лидировать модель 2;
- 2) при смещении веса в сторону большей важности давления модель 4 продолжает быть оптимальной;
- 3) в области значений коэффициента важности от 0,08 до 0,12 отн. ед. расчетные модели 2 и 4 близки друг к другу по итоговым баллам.

### Заключение

Многокритериальные методы поддержки принятия решений, поддающиеся независимой проверке, позволили формализовать выбор расчетной модели динамики по критерию наименьшего отклонения расчетных мощности и давления от экспериментальных данных. При этом решения по всем используемым методам хорошо согласуются между собой как в номинальной постановке задачи, так и при учете погрешностей измерений.

В качестве наиболее предпочтительной признана модель 4 (с доминирующим вкладом канального теплоносителя в Т-эффект и квадратичной зависимостью коэффициента размножения от объемной неравномерности нейтронного поля). Вместе с тем, анализ чувствительности решения к варьируемой значимости (важности) контролируемых параметров показывает возможность смены модели-лидера с четвертой на вторую (с 50 % вкладом МКП в Т-эффект). Следовательно, представляется целесообразным расширить перечень анализируемых параметров для получения статистически более значимой оценки. Полученный результат, тем не менее, показывает возможность ограничения параметрической области исследований для получения следующего приближения в перспективе.

Положительный опыт исследований делает возможным расширение области использования аппарата многокритериальной оценки моделей, например, применительно к задачам обоснования безопасности при переориентации критериев оценки на консервативное описание динамики.

### Библиографический список

1. **Кресов, Д.Г.** Методика учета влияния нейтронного поля на эффекты реактивности в инженерных расчетах / Д.Г. Кресов, Е.В. Оленская // «ВАНТ. Физика ядерных реакторов». 2023. Вып. 2. С. 40-46.
2. Программное средство *ЕСКМ-3Д*: Аттестационный паспорт программного средства / Организация разработчик : АО «ОКБМ Африкантов» / А.В. Давыдов, О.Б. Клочков, А.В. Куликов, Д.Г. Кресов // Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности. – М.: 2015. – 6 с. – Рег. номер ПС № 726 от 11.10.2011. Рег. номер паспорта аттестации ПС № 367 от 18.03.2015.
3. **Давыдов А.В.,** Клочков О.Б., Кресов Д.Г., Куликов А.В. / Программа *ЕСКМ-3Д* // Свидетельство о гос. регистрации №2011615838 от 27.07.2011.
4. **Ильмурзаева, Д.Р.** Анализ и сравнение алгоритмов многокритериального поиска на примере выбора центрифуг / Д.Р. Ильмурзаева, Т.В. Савицкая // *Успехи в химии и химической технологии*. 2020. Т. 14. № 6. С. 115-117.

5. Применение методов многокритериального анализа решений для сравнительной оценки вариантов ядерно-энергетических систем. Обзор заключительного отчета. *IAEA INPRO*. – 24 с. [Электронный ресурс] // Режим доступа: [https://www.iaea.org/default/files/20/04/inpro-kind\\_rus.pdf](https://www.iaea.org/default/files/20/04/inpro-kind_rus.pdf) (дата обращения 23.01.2024).
6. **Андрианов, А.А.** Сравнение моделей реакции глубокого расщепления на основе методов многокритериального анализа решений / А.А. Андрианов, Ю.А. Коровин, И.С. Купцов, А.Ю. Конобеев, О.Н. Андрианова // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2018 № 2. С. 157-168.
7. **Поддиновский, В.В.** Метод взвешенной суммы критериев в анализе многокритериальных решений: *pro et contra* / В.В. Поддиновский, М.А. Потапов // Бизнес-информатика. 2013. № 3(25). С. 41-48.
8. **Кочкина, М.В.** Анализ многокритериальных методов принятия управленческих решений (на примере задачи выбора поставщиков материально-технических ресурсов). Электронный образовательный ресурс для студентов экономических направлений подготовки / Составители: Кочкина М.В., Карамышев А.Н., Махмутов И.И., Исавин А.Г., Розенцвайг А.К. – Набережные Челны: Издательство-полиграфический центр НЧИ К(П)ФУ, 2017. – 31 с.
9. **Ларичев, О.И.** Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных Странах: Учебник / О.И. Ларичев. – М.: Логос, 2000. – 296 с.
10. **Демидовский, А.В.** Сравнительный анализ методов многокритериального принятия решений: ELECTRE, TOPSIS и ML-LDM // Материалы Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://scm.etu.ru/assets/files/2020/scm20/papers/4/234.pdf> (дата обращения 15.01.2024)
11. **Поддиновский, В.В.** Идеи и методы теории важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений / В.В. Поддиновский. – М.: Наука, 2019. – 103 с.
12. **Ларичев, О.И.** Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных странах: Учебник / О.И. Ларичев. – М.: Логос, 2002. – 392 с.

*Дата поступления  
в редакцию: 19.02.2024*

*Дата принятия  
к публикации: 10.04.2024*