

УДК 621.039

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.4.07>

Оригинальная статья / Original paper

Измерения парового коэффициента реактивности в условиях отравления реактора ксеноном и снижения температуры графита

И.А. Прохоров^{1,2}, И.Ф. Моисеев¹, В.Е. Дружинин¹, Д.А. Лысов¹, С.О. Иванов^{1,2}¹АО «ВНИИАЭС»,

109507 Россия, г. Москва, ул. Ферганская, д. 25

²НИУ МЭИ,

111250 Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр.1

Реферат. Паровой коэффициент реактивности является одной из наиболее важных измеряемых нейтронно-физических характеристик реакторов РБМК-1000, характеризующих безопасность реакторной установки и в значительной мере определяющей решения по формированию загрузки активных зон. В связи с этим к точности контроля величины парового коэффициента реактивности предъявляются высокие требования. Измерения парового коэффициента реактивности осуществляются косвенным методом, основанном на измерениях реактивности и технологических параметров при проведении на реакторе РБМК-1000 серии специальных опытов с возмущением расхода питательной воды и опыта по определению эффективности участка стержня автоматического регулирования. Измерения парового коэффициента реактивности выполняются при работе на стационарном уровне мощности в диапазоне от 40 до 98% номинальной. Оценено влияние эффектов нестационарного отравления реактора Xe-135 и изменения температуры графита на оценки величины парового коэффициента реактивности, вычисляемые по результатам измерений. Даны рекомендации по выбору интервала времени выдержки после снижения мощности до начала измерений парового коэффициента реактивности на АЭС с реакторами РБМК-1000, предложен способ обработки измерений, выполненных в вышеописанных условиях.

Ключевые слова: РБМК-1000, реактивность, паровой коэффициент реактивности, отравление реактора.

Для цитирования: Прохоров И.А., Моисеев И.Ф., Дружинин В.Е., Лысов Д.А., Иванов С.О. Измерения парового коэффициента реактивности в условиях отравления реактора ксеноном и снижения температуры графита. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2025;4:96–109. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.4.07>

Введение

Паровой коэффициент реактивности (ПКР) является одной из важнейших измеряемых нейтронно-физических характеристик (НФХ) реакторов РБМК-1000 [1, 2], для которой из условий безопасной эксплуатации установлены границы эксплуатационного диапазона ($0 - 1 \beta_{эф}$).

Значение ПКР определяется соотношением $\alpha_p = d\rho/d\phi$, где $d\rho$ – малое по величине изменение реактивности, вызванное малым изменением паросодержания $d\phi$.

Измерения ПКР выполняются при работе реактора на уровне мощности, близком к номинальному, путем проведения серии из 6 – 12 специальных опытов с возмущением расхода питательной воды (РПВ) и опыта по определению эффективности участка четырех стержней автоматического регулирования (АР), в ходе которых осуществляется регистрация изменения реактивности и ряда технологических параметров реактора.

При положительном значении ПКР опыты с увеличением РПВ приводят к снижению паросодержания и вводу отрицательной реактивности, компенсируемому снижением мощности и возможной отработкой (частичным извлечением) стержней АР. Опыты со снижением РПВ приводят к увеличению паросодержания и вводу положительной реактивности, которая компенсируется ростом мощности и вводом стержней АР в активную зону реактора [3].

В опыте по определению (измерению) эффективности участка стержней АР эти стержни погружаются в активную зону. Перемещение стержней АР осуществляется на участке их отработки при проведении опытов с возмущением РПВ. После перемещения стержней АР мощность снижается и за счет обратных связей стабилизируется на новом уровне. Опыт позволяет оценить эффективность участка стержней АР и получить данные, необходимые для обработки опытов с возмущением РПВ, а также данные для вычисления быстрого мощностного коэффициента реактивности (БМКР)¹.

Вычисление ПКР осуществляется на основе решения системы уравнений баланса реактивности в опытах с возмущением РПВ методом наименьших квадратов (МНК), дополненной уравнением баланса реактивности в опыте по измерению эффективности участка АР.

Комплексная методика реакторных измерений ПКР и БМКР была разработана в конце 70-х годов прошлого века, подтверждена многократными испытаниями и продемонстрировала необходимую точность определения ПКР, особенно, при его достаточно больших значениях. На первых этапах использования методики регистрация технологических параметров (ТП) осуществлялась штатными средствами системы контроля реакторов, позднее были внедрены вспомогательные средства цифровой регистрации параметров.

Измерения для определения ПКР выполняются на стационарном уровне мощности реактора не выше 98% от номинального уровня мощности (3200 МВт(т)). По этой причине перед выполнением измерений номинальная мощность реактора должна быть снижена и для сведения к минимуму влияния на результаты измерений эффекта нестационарного отравления Xe-135 и снижения температуры графита поддерживаться постоянной на уровне, на котором будут проводиться измерения. Продол-

¹ РД ЭО 1.1.2.99.1423-2018 «Комплексная методика определения физических и динамических характеристик реакторов РБМК-1000». М., 2018 (далее – комплексная методика).

жительность временного интервала выдержки до начала измерений определена в методике выполнения измерений ПКР² и составляет не менее 24-х часов. Однако эта рекомендация соблюдается не всегда.

В работе проанализированы эффекты искажения оценок ПКР в измерениях, выполнявшихся в условиях неравновесной концентрации Xe-135 и снижения температуры графита (при выполнении измерений ПКР непосредственно после снижения мощности реактора), и предложен способ корректной обработки таких измерений.

Результаты обработки измерений ПКР в условиях неравновесной концентрации Xe-135 и снижения температуры графита

Перед выполнением измерений ПКР номинальная мощность реактора снижается обычно на 50 – 150 МВт. Характерные графики изменения мощности при выполнении измерений ПКР на трех энергоблоках АЭС с РБМК представлены на рис. 1–3.

Из приведенных графиков следует, что перед выполнением измерений ПКР и БМКР реакторы работают разное время на сниженном уровне мощности. На рисунке 3 характерное время работы реактора на сниженном уровне мощности до начала измерений (время выдержки) составляет примерно 24 часа; на рис. 2 – 10–14 часов, на рис. 1 выдержки практически нет.

При обработке результатов ряда измерений ПКР и БМКР (измерения выполнялись сразу после снижения мощности (см. рис. 1)) было обнаружено систематическое различие оценок ПКР в отдельных опытах с разным знаком возмущения РПВ (табл. 1).



Измерения парового коэффициента реактивности в условиях отравления реактора ксеноном и снижения температуры графита



Рис. 2. Изменение мощности реактора при выполнении измерений ПКР. Измерения выполняют через 11 часов после снижения мощности



Рис. 3. Изменение мощности реактора при выполнении измерений ПКР. Измерения выполняют через 25 часов после снижения мощности

В условиях равновесного Xe-135 и неизменной температуры графита связь изменения реактивности и изменения паросодержания в опытах с возмущением РПВ определяется уравнением баланса реактивности

$$\alpha_{\varphi} \cdot \Delta \varphi_{\text{взв},l} + \alpha_z \cdot \Delta W_l + \rho_{\text{сyz},l} = \rho_{\kappa,l} - \rho_{\text{н},l} \quad (1)$$

где α_{φ} – паровой коэффициент реактивности; l – номер опыта; $\Delta \varphi_{\text{взв},l}$ – изменение паросодержания, взвешенное с квадратом плотности потока нейтронов в реакторе (определяется в теплогидравлическом расчете); $\rho_{\text{сyz},l}$ – изменение реактивности за счет перемещения стержней АР в опыте; ΔW_l – изменение мощности реактора в опыте с возмущением РПВ; $\rho_{\kappa,l}$, $\rho_{\text{н},l}$ – значения реактивности реактора в моменты расчета паросодержания в возмущенном состоянии и невозмущенном состоянии (непосредственно перед началом изменения мощности реактора, вызванного возмущением РПВ); α_z – доплеровская составляющая БМКР (для предварительных оценок α_{φ}

Таблица 1

Оценка ПКР в отдельных опытах и соответствующие МНК-оценки

№ опыта	Знак возмущения РПВ	Оценка ПКР		
		Измерение № 1	Измерение № 2	Измерение № 3
1	+	0,55	0,64	0,88
2	–	–0,30	0,03	0,32
3	+	0,68	0,52	Отбр*
4	–	–0,04	0,19	0,53
5	+	0,54	0,47	0,63
6	–	–0,01	0,19	0,60
7	+	0,47	Отбр*	0,72
8	–	0,01	0,19	0,88
9	+	0,55	–	0,35
10	Взвешивание	0,29	0,49	0,53
МНК-оценка		$0,35 \pm 0,28$	$0,34 \pm 0,18$	$0,74 \pm 0,19$
* опыт отбракован по причине технологической погрешности его выполнения				

в отдельных опытах используется заданная величина, равная $-3,3 \cdot 10^{-4} \beta/\text{МВт}$, оцененная в комплексной методике по результатам измерений).

Индивидуальные оценки α_ϕ в отдельных опытах выполняются при задании в отдельных уравнениях вида (1) известной величины α_z . Из данных табл. 1 видно, что в измерениях № 1 и № 2 наблюдается выраженное систематическое различие между оценками ПКР в опытах при отрицательном и положительном возмущении РПВ. В измерении № 3, где ПКР существенно выше, чем в двух других рассмотренных измерениях, такой систематики не наблюдается.

Итоговую оценку ПКР по результатам измерений вычисляют при решении системы уравнений (1) методом наименьших квадратов (МНК) относительно двух неизвестных (α_ϕ и α_z).

Оценки ПКР с учетом переходного процесса

В случае, если измерения выполняются практически сразу после снижения мощности реактора (см. рис. 1), то они осуществляются на фоне переходного процесса, связанного со снижением температуры графита и отравления неравновесным Хе-135, что должно быть учтено в уравнении баланса реактивности в опыте:

$$\Delta\rho_{\text{Хе},T} + \alpha_\phi \cdot \Delta\phi_{\text{ВЗВ},l} + \alpha_z \cdot \Delta W_l + \rho_{\text{СУЗ},l} = \rho_{\text{к},l} - \rho_{\text{н},l} \quad (2)$$

где $\Delta\rho_{\text{Хе},T}$ – изменение реактивности за счет изменения концентрации Хе-135 и температуры графита.

Из соотношения (2) следует, что применение стандартного подхода (1) для оценки индивидуального значения ПКР в опыте с возмущением РПВ приводит к искажению α_ϕ :

$$\alpha_\phi^{\text{иск}} = \frac{\rho_{\text{к},l} - \rho_{\text{н},l} - \alpha_z \Delta W_l - \rho_{\text{СУЗ},l}}{\Delta\phi_{\text{ВЗВ},l}} \equiv \frac{\alpha_\phi \Delta\phi_{\text{ВЗВ},l} + \Delta\rho_{\text{Хе},T}}{\Delta\phi_{\text{ВЗВ},l}}. \quad (3)$$

Измерения парового коэффициента реактивности в условиях отравления реактора ксеноном и снижения температуры графита

Согласно (3), для опытов с положительным возмущением РПВ (рис. 4), где вносится отрицательная реактивность ($\alpha_{\varphi} \cdot \Delta\varphi_{взв,l}$), отрицательная величина $\Delta\rho_{Xe,T}$ усиливает этот эффект, что приводит к завышению оценки ПКР при использовании системы уравнений (1). В опытах с отрицательным возмущением РПВ (рис. 5), где вносится положительная реактивность, отрицательная $\Delta\rho_{Xe,T}$ частично компенсирует этот эффект, что приводит к занижению оценки ПКР.

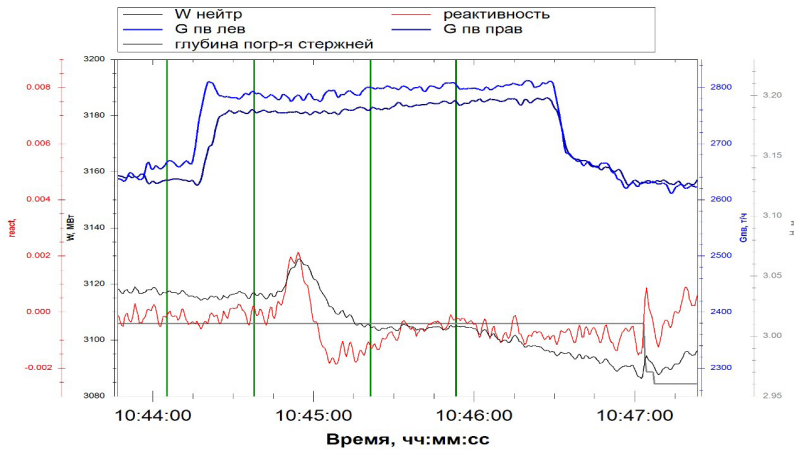


Рис. 4. Графики изменения технологических параметров в опыте с положительным возмущением РПВ: — РПВ через правую половину реактора; — РПВ через левую половину реактора; — положение стержней АР; — опорные временные метки опыта; — мощность реактора; — реактивность

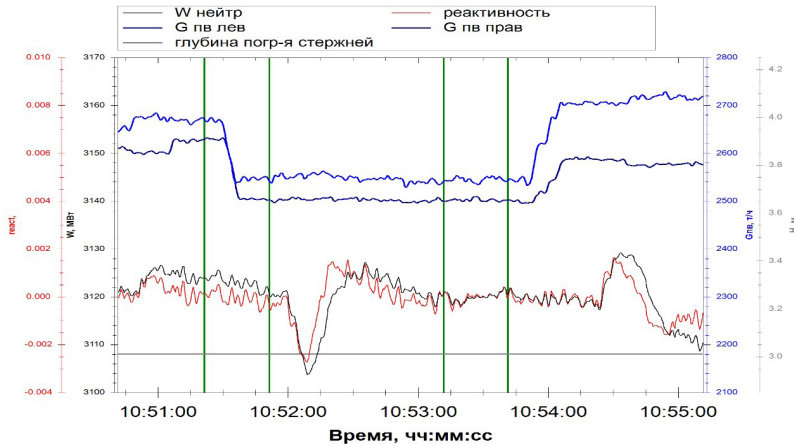


Рис. 5. Графики изменения технологических параметров в опыте с отрицательным возмущением РПВ: — РПВ через правую половину реактора; — РПВ через левую половину реактора; — положение стержней АР; — опорные временные метки опыта; — мощность реактора; — реактивность

Из рисунков 4–5 видно, что при выполнении измерений в нестационарном состоянии реактора изменение мощности реактора между временными метками в опытах, используемое для оценки ПКР, либо отчетливо выражено (в опытах с положительным

возмущением РПВ, рис. 4), либо незначительно (в опытах с отрицательным возмущением РПВ, рис. 5).

Наблюдаемый эффект различия оценок α_ϕ в опытах с разным знаком возмущения РПВ проявляется тем отчетливее, чем меньше сама величина ПКР, когда величина $\Delta\rho_{Xe,T}$ становится сопоставимой с величиной реактивности исходного возмущения по паросодержанию ($\alpha_\phi \cdot \Delta\phi$) (см. соотношение (2)).

Корректную оценку α_ϕ можно получить из решения МНК системы уравнений баланса (2) относительно этих трех неизвестных [4]: α_ϕ , $\Delta\rho_{Xe,T}$, α_z .

Индивидуальные оценки α_ϕ в отдельных опытах выполняются при задании в (2) известных величин $\Delta\rho_{Xe,T}$ и α_z , предварительно полученных из решения МНК соответствующих систем уравнений.

В таблице 2 приведены оценки ПКР в отдельных опытах с возмущением РПВ для измерения № 2 (см. табл. 1).

Таблица 2

Оценка ПКР в отдельных опытах при измерениях ПКР

№ опыта	Знак возмущения РПВ	Оценка ПКР, $\beta_{эф}$. Измерение № 2	
		система уравнений (1)	система уравнений (2)
1	+	0,640	0,451
2	–	0,026	0,348
3	+	0,519	0,386
4	–	0,193	0,391
5	+	0,472	0,364
6	–	0,186	0,373
7	+	Отбр.	Отбр.
8	–	0,192	0,416
9	+	0,488	0,368
10	Взвешивание	0,119	0,380
МНК-оценка		$0,34 \pm 0,18$	$0,38 \pm 0,03$

При использовании системы уравнений вида (2), явно учитывающих $\Delta\rho_{Xe,T}$ оценки ПКР в отдельных опытах с возмущением РПВ разного знака выравниваются (см. табл. 2), а неопределенность МНК-оценки ПКР заметно снижается (с $0,18 \beta_{эф}$ до $0,03 \beta_{эф}$).

Результаты обработки измерений на основе решения системы уравнений баланса реактивности (2) МНК относительно трех неизвестных и время выдержки ($T_{выд}$) реактора на сниженном уровне мощности перед выполнением измерений на разных АЭС с РБМК приведены в табл. 3.

В таблице 4 приведены оценки α_ϕ и α_z , полученные при решении системы уравнений (1).

Из данных табл. 2 – 4 можно сделать следующие выводы:

- причиной выраженного различия оценок ПКР в опытах с разным знаком возмущения РПВ в измерениях с $T_{выд} = 0$ (см. табл. 2) является использование уравнений баланса реактивности вида (1), не учитывающих действие медленных обратных связей по мощности (нестационарное отравления Xe-135 и эффект снижения температуры графита);

Таблица 3

Решение системы уравнений вида (2) для измерений ПКР на энергоблоках АЭС с РБМК

Номер измерения	Дата	$\Delta\rho_{\text{Xe,Tr}} \text{ цент}$		$\alpha_z, \text{ цент/МВт}$		$\alpha_{\text{пр}}, \beta_{\text{эф}}$		$T_{\text{выд}}, \text{ час}$
		Знач	Неопр	Знач	Неопр	Знач	Неопр	
1	16.10.2023	-0,160	0,13	-0,033	0,004	0,461	0,106	0
2	24.04.2024	-0,175	0,11	-0,036	0,003	0,46	0,087	0
3	04.09.2024	-0,154	0,042	-0,037	0,001	0,318	0,037	0
4	24.07.2023	-0,075	0,26	-0,037	0,007	0,753	0,212	0
5	13.05.2024	-0,324	0,074	-0,037	0,002	0,366	0,064	0
6	28.08.2024	-0,26	0,033	-0,038	0,001	0,383	0,027	0
7	15.06.2022	0,063	0,087	-0,03	0,003	0,52	0,071	13
8	18.07.2022	0,053	0,197	-0,038	0,006	0,764	0,12	13
9	29.08.2023	-0,057	0,092	-0,034	0,002	0,353	0,065	12,5
10	25.10.2021	-0,036	0,122	-0,032	0,004	0,669	0,111	14
11	05.03.2022	-0,015	0,124	-0,039	0,003	0,867	0,093	13,5
12	10.01.2023	-0,011	0,14	-0,036	0,006	0,648	0,128	23
13	12.07.2023	0,003	0,092	-0,031	0,004	0,660	0,077	10
14	25.04.2022	0,013	0,096	-0,032	0,006	0,631	0,158	27
15	09.11.2023	-0,01	0,064	-0,03	0,006	0,545	0,122	25,5
16	08.06.2023	-0,028	0,061	-0,03	0,003	0,649	0,089	25
17	07.11.2023	-0,036	0,059	-0,027	0,003	0,668	0,094	26
18	18.07.2023	0,014	0,047	-0,029	0,002	0,462	0,078	26

• при использовании для обработки измерений с $T_{\text{выд}} = 0$ уравнений баланса реактивности вида (2) оценки ПКР в опытах с разным знаком возмущения РПВ выравниваются по сравнению со штатной обработкой (см. табл. 2);

• поскольку искажение оценок ПКР в отдельных опытах в измерениях с $T_{\text{выд}} = 0$ зависит от знака возмущения РПВ (одни оценки завышаются, другие занижаются), то итоговые МНК-оценки ПКР, полученные при решении системы (1), несущественно отличаются от оценок ПКР, полученных при решении системы (2) (см. табл. 3–4), однако неопределенность расчетных оценок вследствие исключения эффекта различия оценок ПКР в опытах с разным знаком возмущения РПВ при решении системы уравнений (2) для измерений с $T_{\text{выд}} = 0$ заметно снижается по сравнению с расчетными оценками при использовании системы уравнений (1) (см. табл. 3–4).

Как уже отмечалось, искажение оценок ПКР в отдельных опытах при штатной обработке измерений, выполнявшихся в условиях переходного процесса, выражено тем более отчетливо, чем ниже значение измеряемой величины ПКР (соотношение (3)). Именно поэтому рассматриваемый эффект проявится, когда ПКР приближается к нижней границе эксплуатационного диапазона (см. табл. 1).

На основании данных табл. 3, где представлены оценки величины $\Delta\rho_{\text{Xe,Tr}}$ полученные из решения системы уравнений баланса реактивности вида (2) для измерений ПКР на разных АЭС, построена зависимость этого параметра от продолжительности

Таблица 4

Решение системы уравнений вида (1) для измерений ПКР на энергоблоках АЭС с РБМК

Номер измерения	Состояние	α_{zz} , цент/МВт		$\alpha_{\varphi}, \beta_{\Delta\varphi}$	
		Знач	Неопр	Знач	Неопр
1	16.10.2023	-0,031	0,006	0,44	0,158
2	24.04.2024	-0,034	0,005	0,422	0,151
3	04.09.2024	-0,035	0,004	0,317	0,135
4	24.07.2023	-0,036	0,006	0,736	0,194
5	13.05.2024	-0,034	0,006	0,38	0,248
6	28.08.2024	-0,034	0,007	0,341	0,181
7	15.06.2022	-0,031	0,003	0,554	0,061
8	18.07.2022	-0,039	0,005	0,774	0,109
9	29.08.2023	-0,034	0,002	0,343	0,069
10	25.10.2021	-0,0313	0,0035	0,66	0,102
11	05.03.2022	-0,039	0,003	0,865	0,089
12	10.01.2023	-0,036	0,0051	0,646	0,116
13	12.07.2023	-0,031	0,0032	0,66	0,071
14	25.04.2022	-0,032	0,0056	0,633	0,15
15	09.11.2023	-0,030	0,005	0,542	0,116
16	08.06.2023	-0,031	0,004	0,642	0,186
17	07.11.2023	-0,027	0,003	0,65	0,093
18	18.07.2023	-0,029	0,002	0,464	0,075

временного интервала выдержки реактора на сниженном уровне мощности перед выполнением измерений (рис. 6).

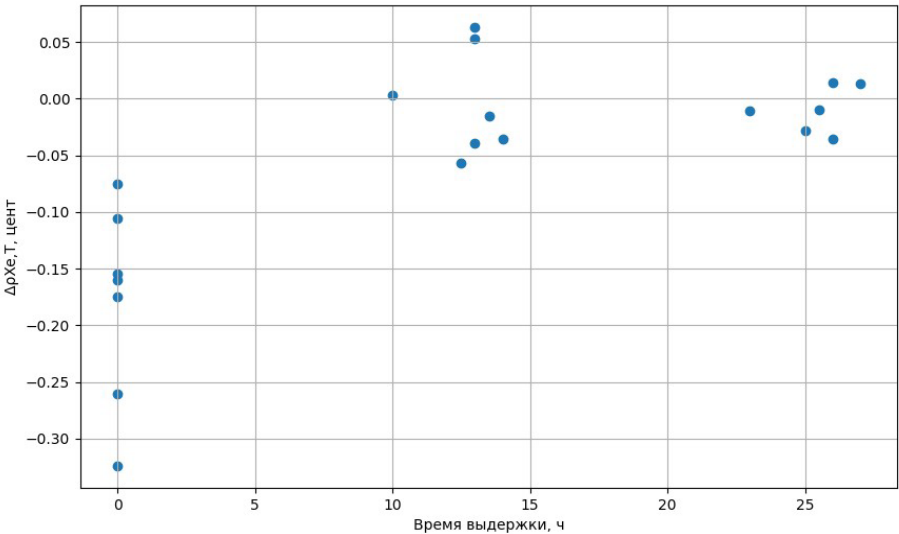


Рис. 6. Зависимость расчетной величины $\Delta\rho_{Xe,T}$ (•) от $T_{\text{выд}}$ (по данным табл. 3)

Из представленных данных видно, что величина $\Delta\rho_{\text{Xe},T}$ близка к нулю во временных зонах, соответствующим временам выдержки $T_{\text{выд}} > 10$ ч. Для $T_{\text{выд}} = 0$ величина $\Delta\rho_{\text{Xe},T}$ может принимать целый спектр значений в зависимости от уровня снижения мощности перед измерениями и от продолжительности выполнения измерений.

На основании данных, представленных на рис. 6, можно заключить, что требования комплексной методики несколько консервативны и выдержки $T_{\text{выд}} = 10$ ч на сниженном уровне мощности достаточно для того, чтобы эффекты нестационарного отравления ксеноном и изменения температуры графита не оказывали влияния на оценку величины ПКР в опытах с изменением РПВ.

Стоит отметить, что стабилизация температуры графита происходит за времена существенно более короткие, нежели время стабилизации отравления ксеноном (Xe-135) на новом уровне мощности.

Расчетная оценка изменения реактивности, вызванного нестационарным отравлением реактора и изменением температуры графита

В дополнение к оценкам величины $\Delta\rho_{\text{Xe},T}$ из решения системы уравнений баланса (2) (см. табл. 3) была проведена независимая расчетная оценка этого параметра.

Для измерения № 5 из табл. 3 с применением программного комплекса (ПК) «Polaris» [5] было рассчитано изменение концентрации Xe-135 во времени после снижения мощности реактора и оценено изменение реактивности, обусловленное изменением концентрации Xe-135. Соответствующие результаты представлены на рис. 7.

По данным рис. 7 можно оценить величину изменения реактивности, обусловленного изменением концентрации Xe-135 в опыте с возмущением РПВ:

$$\Delta\rho_{\text{Xe}} = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\tau_1 - \tau_2} \cdot \tau_{\text{оп}} = \frac{-399 - (-402)}{0 - 60} \cdot 2 = -0,1 \text{ цент,} \quad (4)$$

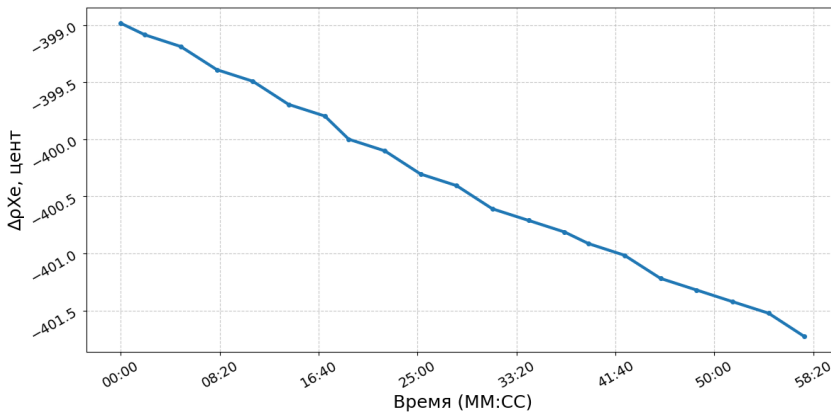


Рис. 7. Изменение реактивности, вызванное изменением концентрации Xe во время выполнения измерения № 5 (см. табл. 3)

где ρ_1, ρ_2 – значения реактивности в начале и в конце измерения ПКР соответственно, [цент]; τ_1, τ_2 – время в начале и в конце измерения ПКР соответственно, мин; $\tau_{\text{оп}}$ – время выполнения отдельного опыта с возмущением ПКР (2 мин).

Оценка изменения реактивности, обусловленного изменением температуры графита, получена из анализа зависимости изменения средней по термопарам температуры графита (T_g) от времени во время выполнения рассматриваемого измерения ПКР. На рисунке 8 представлено изменение средней температуры графитовой кладки во время измерений.

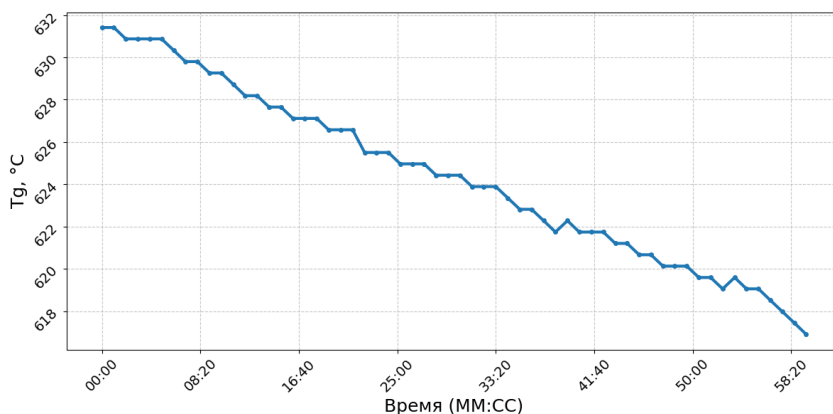


Рис. 8. Изменение средней температуры графитовой кладки во время выполнения измерения № 5 (см. табл. 3)

На основании данных рис. 8 изменение реактивности, обусловленное изменением температуры графита в интервале опыта с возмущением РПВ, можно вычислить из соотношения

$$\Delta\rho_{Tg} = \alpha_c \cdot \frac{\Delta T_{\text{взв}}}{\tau} \cdot \tau_{\text{оп}} = 0,5 \cdot \frac{-15}{60} \cdot 2 = -0,25 \text{ цент}, \quad (5)$$

где α_c – коэффициент реактивности по температуре графита (расчет Polaris, $\alpha_c = 0,5$ цент/°C); $\Delta T_{\text{взв}}$ – изменение средневзвешенной с квадратом объемного энергораспределения температуры графита во время измерений (величины ΔT и $\Delta T_{\text{взв}}$ определяются на основе показаний 12-ти термопар, величина $\Delta T_{\text{взв}}$ совпала с величиной ΔT); τ – время выполнения измерений.

Суммарное изменение реактивности, вызванное нестационарным отравлением реактора и изменением температуры графита за время опыта с возмущением РПВ для измерения № 5 (табл. 3), составило

$$\Delta\rho_{\text{Xe},T} = \Delta\rho_{\text{Xe}} + \Delta\rho_{Tg} = -0,10 - 0,25 = -0,35 \text{ цент}.$$

Оценка $\Delta\rho_{\text{Xe},T}$, полученная при решении системы уравнений вида (2) ($\Delta\rho_{\text{Xe},T} = -0,324$ цент), хорошо согласуется с независимой расчетной оценкой $\Delta\rho_{\text{Xe},T}$, что свидетельствует о достоверности и корректности подхода к обработке результатов

измерений ПКР, выполнявшихся непосредственно после снижения мощности на основании системы балансных уравнений реактивности, явно учитывающих изменение реактивности, обусловленное эффектами отравления реактора и снижения температуры графита.

Заключение

В работе проанализировано влияние нестационарного отравления Хе-135 и изменения температуры графита кладки реактора РБМК-1000 на оценки парового коэффициента реактивности по результатам его измерений в зависимости от продолжительности временного интервала выдержки работы реактора на пониженном уровне мощности.

По результатам анализа получены следующие выводы.

- Требование комплексной методики по продолжительности временного интервала выдержки работы реактора на пониженном уровне мощности в течение 24-х часов перед началом измерений ПКР консервативно обеспечивают правомерность выполнения обработки измерений без необходимости учета влияния изменения концентрации Хе-135 и температуры графита на значения ПКР в опытах с возмущением РПВ.

- Процессы нестационарного отравления Хе-135 и снижение температуры графита не оказывают влияния на результаты измерений ПКР при сокращении временного интервала выдержки работы реактора на пониженном уровне мощности до 10–12-ти часов, что позволяет смягчить соответствующие требования комплексной методики. Сокращение временного интервала работы реактора на пониженном уровне мощности также способствует уменьшению недовыработки электроэнергии и увеличению коэффициента использования установленной мощности энергоблока.

- При выполнении измерений ПКР при минимальном ($T_{\text{выд}} \approx 0$) временном интервале выдержки работы реактора на пониженном уровне мощности обработка результатов должна проводиться с использованием скорректированных уравнений баланса реактивности с учетом изменения реактивности, вызванного нестационарным отравлением Хе-135 и изменением температуры графита. При использовании стандартной системы уравнений баланса реактивности обработка измерений, выполнявшихся в этих условиях, приводит к существенному искажению оценок ПКР в отдельных опытах с положительным и отрицательным возмущением расхода питательной воды и соответствующему увеличению неопределенности итоговой оценки ПКР.

Литература

1. Алимов Ю.В., Баловнев А.В., Давыдов В.К., Жирнов А.П., Ионов А.И., Кузнецов П.Б., Рождественский И.М., Рождественский М.И., Сахарова Т.Ю., Юферева В.А. Нейтронно-физические характеристики и ядерная безопасность РБМК. *Атомная энергия*. 2017;123(5):266–269. URL: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/615> (дата обращения 05.08.2025).
2. Балыгин А.А., Краюшкин А.В. Изменение реактивности и мощности РБМК при измерении парового коэффициента реактивности. *Атомная энергия*. 2006;100(3):171–172. URL: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1824> (дата обращения 05.08.2025).
3. Прохоров И.А., Иванов И.Е., Моисеев И.Ф., Дружинин В.Е. Неопределенности обработки опытов по взвешиванию участка стержней автоматического регулятора при измерении паро-

вого коэффициента реактивности на реакторе РБМК. *Глобальная энергия*. 2024;30(1):69–81.
DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30103>

4. Жуковский Е.Л. Метод наименьших квадратов для вырожденных и плохо обусловленных систем линейных алгебраических уравнений. *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 1977;17(4):814–827. URL: <https://www.mathnet.ru/rus/zvmmf5933> (дата обращения: 05.08.2025).

5. «POLARIS с библиотекой констант «БМП» (версия 6.2). Аттестационный паспорт программного средства, рег. № 440, 2018. М.: АО «ВНИИАЭС», 2018.

Поступила в редакцию 14.05.2025

После доработки 27.10.2025

Принята к опубликованию 27.11.2025

Авторы

Прохоров Игорь Александрович, инженер 1 категории, аспирант НИУ «МЭИ»,

E-mail: prokhorov.igor2202@mail.ru

Моисеев Игорь Федорович, руководитель проекта, к.ф.-м.н.,

E-mail: mif898@mail.ru

Дружинин Владимир Евгеньевич, руководитель департамента, к.т.н.,

E-mail: vedruzhinin@vniiaes.ru

Лысов Дмитрий Александрович, начальник отдела,

E-mail: DALysov@vniiaes.ru

Иванов Сергей Олегович, руководитель проекта, доцент, к.т.н.,

E-mail: SOIvanov@vniiaes.ru

UDC 621.039

Measurement of the Void Reactivity Coefficient Under Reactor Xenon Poisoning and Graphite Temperature Reduction

Prokhorov I.A.^{1,2}, Moiseev I.F.¹, Druzhinin V.E.¹, Lysov D.A.¹, Ivanov S.O.^{1,2}

¹ VNIIAES JSC

25 Ferganskaya St., Moscow, 109507, Russia

² MPEI,

14 Krasnokazarmennaya St., Bld. 1, Moscow, 111250, Russia

Abstract

The steam void reactivity coefficient is one of the most important measured neutronic characteristics of RBMK-1000 reactors. It characterizes the safety of the reactor unit and largely determines decisions regarding the formation of core loading patterns. In view of this, high requirements are imposed on the accuracy of monitoring the value of the steam void reactivity coefficient.

Measurements of the steam void reactivity coefficient are carried out by an indirect method. This method is based on measurements of reactivity and technological parameters obtained during a series of special experiments conducted on the RBMK-1000 reactor. These experiments include tests with perturbation of the feedwater flow rate as well as a separate test for determining the reactivity worth of a segment of the automatic regulator rod. The measurements of the steam void reactivity coefficient are performed

while the reactor is operating at a steady-state power level in the range from 40% to 98% of nominal power.

The article evaluates the influence of non-stationary xenon-135 poisoning effects and changes in graphite temperature on the estimates of the steam void reactivity coefficient that are calculated from the measurement results. Based on this evaluation, recommendations are provided for the selection of the hold time interval after power reduction and before the start of steam void reactivity coefficient measurements at nuclear power plants equipped with RBMK-1000 reactors. In addition, a method for processing the measurements performed under the above-described conditions is proposed. This method is intended to improve the reliability of the resulting estimates by accounting for the identified transient effects during data analysis.

Keywords: RBMK-1000, reactivity, steam coefficient of reactivity, reactor poisoning.

For citation: Prokhorov I.A., Moiseev I.F., Druzhinin V.E., Lysov D.A., Ivanov S.O. Measurement of the Void Reactivity Coefficient Under Reactor Xenon Poisoning and Graphite Temperature Reduction. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;4:96–109. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.4.07> (in Russian).

References

1. Alimov Yu.V., Balovnev A.V., Davydov V.K., Zhirnov A.P., Ionov A.I., Kuznetsov P.B., Rozhdestvenskii I.M., Rozhdestvenskii M.I., Sakharova T.Yu., Yufereva V.A. RBMK Neutron-Physical Characteristics and Nuclear Safety. *Atomic Energy*. 2018;123(5):321–325. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-018-0346-0>
2. Balygin A.A., Krayushkin A.V. Change of RBMK reactivity and power during measurements of the steam coefficient of reactivity. *Atomic Energy*. 2006;100(3):169–171. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-006-0068-6>
3. Prokhorov I.A., Ivanov I.E., Moiseev I.F., Druzhinin V.E. Uncertainties in processing the experiment to determine the efficiency of the section of the automatic regulator rods when measuring the void coefficient of reactivity at the RBMK reactor. *Global Energy*. 2024;30(1):69–81. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30103> (in Russian).
4. Zhukovskii E. L. The method of least squares for degenerate and ill-posed systems of linear algebraic equations U.S.S.R. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 1977;17(4):3–16. DOI: [https://doi.org/10.1016/0041-5553\(77\)90098-2](https://doi.org/10.1016/0041-5553(77)90098-2)
5. POLARIS with BMP Constant Library (Version 6.2). Software Certification Passport, Reg. No. 440, 2018. Moscow, VNIIAES JSC, 2018.

Authors

Igor A. Prokhorov, Engineer 1st category, Postgraduate student,
E-mail: prokhorov.igor2202@mail.ru

Igor F. Moiseev, Project Manager, Cand. Sci. (Phys-Math.),
E-mail: mif898@mail.ru

Vladimir E. Druzhinin, Department Head, Cand. Sci. (Engineering),
E-mail: vedruzhinin@vniiaes.ru

Dmitry A. Lysov, Division Chief,
E-mail: DALysov@vniiaes.ru

Sergey O. Ivanov, Project Manager, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering),
E-mail: SOIvanov@vniiaes.ru