

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА РЕАКТИВНОСТИ ДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ КСЕНОНА

Н.А. Виногоров, Ю.А. Грознов, Д.Н. Жуковский

НИТИ им. А.П. Александрова, г. Сосновый Бор



Рассмотрены некоторые методические особенности применения известного метода измерений температурного коэффициента реактивности в условиях переходного ксенонового процесса. В статье приведены результаты, полученные в изотермическом состоянии водо-водяного реактора транспортного назначения.

Температурные коэффициенты реактивности относятся к числу нейтронно-физических характеристик, величина которых определяется экспериментально как при пуске, так и в процессе эксплуатации реактора. Применяемые методы измерений представлены в многочисленных источниках (см., например, [1–3]).

В частности, для определения температурного коэффициента реактивности α_T водо-водяного реактора применяется динамический метод [1], в соответствии с которым в нестационарном состоянии реактора одновременно измеряются реактивность ρ и температура T , величина коэффициента определяется как

$$\alpha_T = \frac{\partial \rho / \partial t}{dT / dt}. \quad (1)$$

Достоинствами метода можно считать относительную простоту измерений и обработки экспериментальных данных.

Соотношение (1) применимо, если возможные в нестационарном состоянии изменения других параметров реактора (кроме температуры) оказывают пренебрежимо малое влияние на реактивность. В противном случае необходимы дополнительные измерения, позволяющие это влияние исключить. К примеру, в [1] обсуждается проведение измерений, сопровождающееся изменением давления в первом контуре, а также изменением концентрации борной кислоты.

В случае проведения измерений в условиях нестационарного отравления, изменение концентрации ксенона является постоянно действующим фактором, изменяющим реактивность. Цель настоящей статьи – рассмотреть некоторые методические особенности измерения температурного коэффициента реактивности в этих условиях.

Рассмотрение проведем на примере измерений, выполненных на стенде, предназначенном для полномасштабных испытаний ЯЭУ ледокольного типа [4]. Нейтронно-физические характеристики реактора типичны для транспортных водо-водяных реакторов [5].

Измерения проводились в изотермическом режиме работы реактора в разотравленном состоянии и в переходных ксеноновых процессах. Изотермичность здесь понимается как приблизительное равенство температур всех компонентов активной зоны (в частности, перепад температуры теплоносителя между входом в активную зону и выходом из нее не превышал 2°C). Изотермичность обеспечивалась отключением парогенераторов по воде второго контура и большой скоростью циркуляции теплоносителя первого контура. Исключение отбора тепла вторым контуром циркуляции обуславливает низкий уровень мощности. Изменение температуры обеспечивалось за счет реакции деления при дистанционном режиме регулирования. Требования, предъявляемые обычно к режиму работы реактора при измерениях температурного коэффициента [2], были выполнены.

Характер переходных процессов, в которых измерялась величина температурного коэффициента в разотравленном по ксенону состоянии реактора, показан на рис. 1. Представлены изменения средней температуры теплоносителя (полусуммы температур на входе и на выходе из активной зоны) и реактивности, вызванные последовательными подъемами стержней регулирования. На интервале «ab» наблюдается процесс саморегулирования от момента возмущения реактивности до стабилизации, последующие интервалы представляют начальные участки таких же процессов, прерываемых перемещениями стержней.

В соответствии с динамическим методом измерения температурного коэффициента, выражаемым соотношением (1), необходимо одновременно измерять реактивность и температуру на участках переходного процесса вблизи значений $\rho=0$, в пределах которых изменение реактивности и температуры можно считать линейным (участки «cd», «ef» рис. 1).

В условиях изотермичности режима и малой мощности реактора, при многократном превышении характерного времени переходного процесса над временем циркуляции теплоносителя по контуру, коэффициент реактивности по температуре воды будем считать изотермическим температурным коэффициентом реактивности.

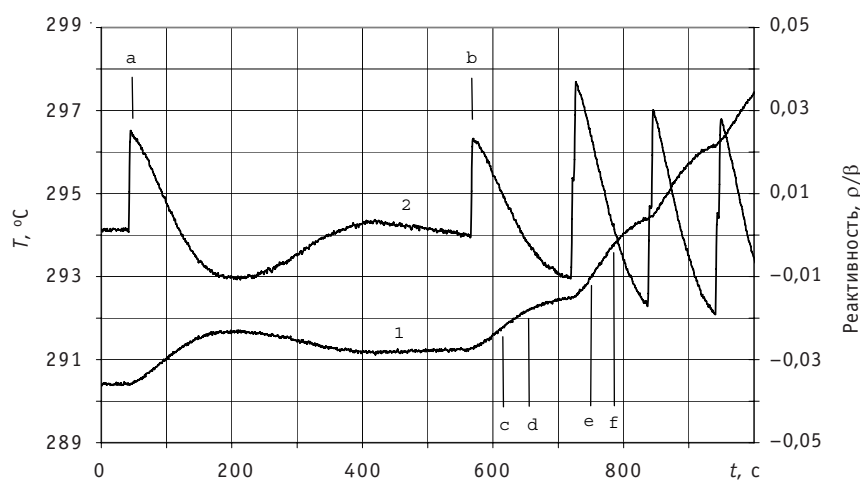


Рис. 1. Изменение параметров в пределах интервала режима разогрева: 1 — температура; 2 — реактивность

Изменение параметров в переходном процессе можно промоделировать, записав модель в виде:

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = \frac{1}{\beta} \left(\rho\lambda + \frac{d\rho}{dt} \right) n \\ C \frac{d\theta}{dt} = n - n_0 - A\theta, \\ \frac{d\rho}{dt} = \alpha_r \frac{d\theta}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

где n – мощность реактора; β, λ – эффективная доля запаздывающих нейтронов и постоянная распада их предшественников (в одгрупповом приближении) соответственно; $\theta = T - T_0$ – отклонение температуры от начального (перед возмущением реактивности при начальной мощности n_0) значения; T_0 ; C – обобщенная теплоемкость; A – положительная постоянная, имеющая смысл коэффициента теплопередачи.

Первое из уравнений системы (2) описывает нейтронную кинетику в приближении мгновенного скачка (см. [6]), два других – теплообмен и обратную связь.

После линеаризации может быть получено аналитическое решение системы уравнений, в соответствии с которым при начальных условиях $n(0)=n_0$, $\theta(0)=0$, $\rho(0)=\rho_0$ процесс саморегулирования, инициированный возмущением реактивности $\rho_0 \ll \beta$, представляет собой затухающие гармонические колебания.

Характер переходных процессов в изотермическом режиме при нестационарной концентрации ксенона показан на рис. 2. Такие режимы реализовывались после снижения мощности стационарно отравленного ксеноном реактора до уровня, необходимого для поддержания заданной температуры при осушенных по воде второго контура парогенераторах. Переходный процесс, вызванный перемещением стержней регулирования (интервал «ab» рис. 2), в данном случае «накладывается» на переходный ксеноновый процесс, вследствие которого температура изменяется практически линейно вне интервала «ab» (рис. 2).

Обусловленное изменением концентрации ксенона изменение реактивности можно рассматривать как внешнее возмущающее воздействие. При этом на интер-

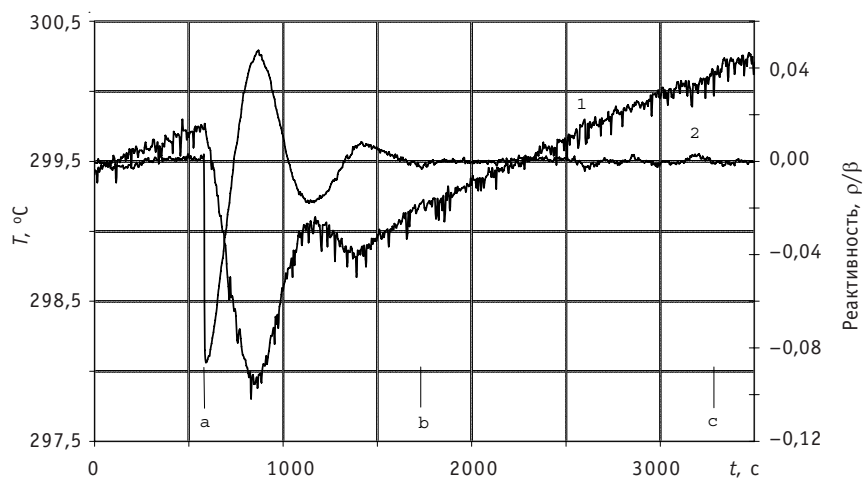


Рис. 2. Изменение параметров в пределах интервала режима разотравления: 1 – температура; 2 – реактивность

валах времени длительностью 10–20 мин это воздействие можно считать линейной функцией времени, т.к. периоды полураспада ^{135}I и ^{135}Xe составляют несколько часов.

В сравнении с режимами разогрева, изменение концентрации ксенона является единственной существенной особенностью изотермического режима разотравления. Поэтому математическая модель переходных процессов, инициируемых перемещением стержней регулирования, в режиме разотравления отличается от модели (2) только последним уравнением, которое принимает вид:

$$\frac{d\rho}{dt} = \alpha_T \frac{d\theta}{dt} + \delta, \quad (3)$$

где δ – скорость отравления, которую на интервалах длительностью 10–20 мин можно считать постоянной величиной.

Приближенное аналитическое решение системы уравнений, состоящей из двух первых уравнений системы (2) и уравнения (6), отличается от (3) наличием линейного по времени слагаемого. Асимптотическое ($t \rightarrow \infty$) значение реактивности

отлично от нуля $\left(\rho_\infty = -\frac{A\beta}{\alpha_T n_0 \lambda} \delta \right)$ [7]. В соответствии с решением, после затухания гармонических колебаний температура изменяется линейно со скоростью $(dT/dt)_{\text{Xe}} = \delta/\alpha_T$.

В течение изотермического режима разотравления температура активной зоны поддерживалась в пределах $\pm 3^\circ\text{C}$ от заданной. Режим в целом можно считать состоящим из последовательности интервалов, подобных представленному на рис. 2. При отклонении температуры от заданного значения на величину ΔT , перемещением стержней реактор выводился из начального, близкого к критическому ($\rho_\infty \ll \beta$), состояния с целью приведения температуры к заданному значению. После перемещения стержней следовал процесс саморегулирования, в течение которого температура сначала приближалась к заданной, затем компенсируя эффект отравления, вновь отклонялась, что требовало очередного перемещения стержней.

Любому моменту режима разотравления может быть сопоставлено значение $(dT/dt)_{\text{Xe}} = \delta/\alpha_T$. При постоянной реактивности ρ_∞ (участок «bc» рис. 2) величина $(dT/dt)_{\text{Xe}}^{\text{изм}}$ может быть вычислена по зарегистрированной температуре. На рис. 3 представлены такие данные для одного из переходных ксеноновых процессов. Аппроксимируя полученные данные, можно определить величину $(dT/dt)_{\text{Xe}}$ на интервалах изменяющейся реактивности (участок «ab» рис. 2). Представляя на ин-

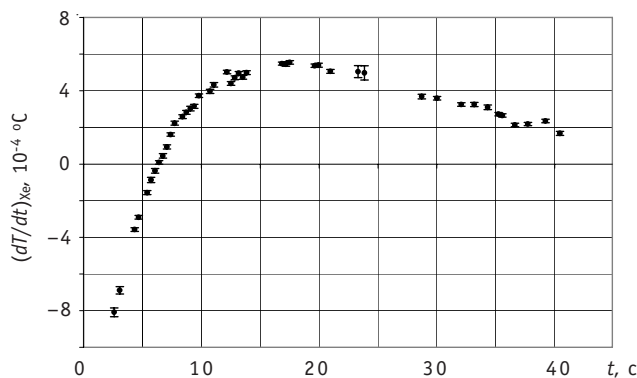


Рис. 3. Величина $(dT/dt)_{\text{Xe}}$ в процессе разотравления реактора

тервалах изменяющейся реактивности скорость отравления δ произведением $\alpha_T (dT/dt)_{\text{хе}}$ из (3) получим

$$\alpha_T = \frac{d\rho/dt}{dT/dt + (dT/dt)_{\text{хе}}} \quad (4)$$

Соотношение (4) представляет динамический метод измерения температурного коэффициента реактивности в условиях нестационарной концентрации ксенона. В данном случае, кроме одновременных измерений реактивности и температуры, необходимо дополнительно проводить специальные измерения температуры на интервалах переходного ксенонового процесса, что позволяет определить поправку $(dT/dt)_{\text{хе}}$.

Значимость поправки подтверждается результатами измерений. В табл. 1 и 2 приведены скорости изменения средней температуры dT/dt , определенные в течение переходных ксеноновых процессов с целью получения значений температурного коэффициента реактивности и соответствующие им поправки $(dT/dt)_{\text{хе}}$. Приведены максимальные по абсолютной величине скорости изменения температуры dT/dt , соответствующие моментам первого прохождения реактивностью значений $\rho=0$ в колебательном процессе, вызванном перемещением стержней. Как следует из табл. 1, скорость dT/dt существенно зависит от величины внесенного стержнями возмущения реактивности, которое не должно быть по модулю больше 10–15 центов для выполнения условия $\rho < \beta$. Другими параметрами, от которых зависит величина производных в знаменателе соотношения (4), являются температурный

Таблица 1

Скорости изменения температуры и величины поправок при измерениях в режиме разотравления (заданная температура номинальная; уровень мощности до перехода в изотермическое состояние – 25% номинальной)

$t, \text{с}$	$\Delta\rho, \rho/\beta$	$dT/dt, 10^{-3} \text{°C/c}$	$(dT/dt)_{\text{хе}}, 10^{-3} \text{°C/c}$	$ dT/dt (dT/dt)_{\text{хе}}$
2.69	0.04	4.09	–0.81	0.20
3.22	0.05	5.86	–0.63	0.11
3.73	0.05	6.65	–0.50	0.08
10.05	0.13	–13.06	0.37	0.03
14.43	0.05	–5.54	0.52	0.09
16.21	0.05	–5.97	0.54	0.09
17.82	0.10	–10.37	0.53	0.05
18.98	0.07	–8.05	0.53	0.07
21.93	0.06	–6.71	0.50	0.08
23.42	0.07	–7.15	0.49	0.07
25.87	0.07	–7.94	0.45	0.06
27.43	0.04	–3.65	0.43	0.12
28.96	0.10	–10.32	0.40	0.04
30.24	0.08	–8.30	0.38	0.05
35.87	0.08	–7.95	0.25	0.03
38.69	0.06	–5.87	0.20	0.04
41.17	0.05	–5.55	0.20	0.04

Примечания: t – время от начала переходного ксенонового процесса; $\Delta\rho$ – величина возмущения реактивности, вносимого перемещением стержней регулирования.

Таблица 2

Скорости изменения температуры и величины поправок при измерениях в режиме разотравления (заданная температура номинальная; уровень мощности до перехода в изотермическое состояние – 80% номинальной)

$t, \text{ч}$	$\Delta\rho, \rho/\beta$	$dT/dt, 10^{-3} \text{°C/c}$	$(dT/dt)_{\text{хе}}, 10^{-3} \text{°C/c}$	$ dT/dt /(dT/dt)_{\text{хе}}$
4.71	0.04	3.10	-1.93	0.62
5.21	0.04	2.94	-1.55	0.53
9.81	0.05	-6.10	0.31	0.05
10.78	0.10	-8.81	0.47	0.05
12.87	0.13	-13.55	0.77	0.06
16.36	0.11	-8.98	1.18	0.13
17.45	0.12	-11.47	1.27	0.11
18.86	0.11	-10.38	1.36	0.13
20.77	0.08	-6.42	1.42	0.22
23.98	0.06	-5.31	1.40	0.26
25.87	0.05	-4.92	1.33	0.27
27.21	0.07	-7.08	1.25	0.18
29.19	0.05	-4.88	1.12	0.23
32.89	0.10	-9.58	0.84	0.09
34.37	0.09	-9.04	0.73	0.08
36.69	0.08	-8.32	0.59	0.07
40.23	0.07	-8.05	0.43	0.05
42.15	0.08	-8.19	0.38	0.05
44.81	0.06	-5.85	0.33	0.06
46.32	0.05	-5.46	0.29	0.05

Примечания: t – время от начала переходного ксенонового процесса; $\Delta\rho$ – величина возмущения реактивности, вносимого перемещением стержней регулирования.

коэффициент реактивности α_T и δ – скорость отравления. С увеличением абсолютной величины отрицательного температурного коэффициента увеличивается скорость изменения температуры в динамическом режиме dT/dt и уменьшается скорость изменения температуры $(dT/dt)_{\text{хе}}$ на участках «динамического баланса». При увеличении скорости отравления величина $(dT/dt)_{\text{хе}}$ возрастает, что, в частности, можно видеть из данных, приведенных в табл. 1 и 2.

Представленные данные показывают, что пренебрежение влиянием нестационарного отравления приводит к погрешности результата измерений, относительная величина этой погрешности оценивается как минимум в 2–4%.

Таким образом, изменение отравления ксеноном в процессе измерения температурного коэффициента реактивности динамическим методом может оказать существенное влияние на результат. Для исключения этого влияния необходимы дополнительные измерения скорости изменения температуры и введения поправки в соответствии с выражением (4).

Литература

1. Аборина И.Н. Физические исследования реакторов ВВЭР. – М.: Атомиздат, 1978.
2. Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Экспериментальные методы физики реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
3. Herr J.D. and Thomas J.R., Noise Jr. Analysis Method for Monitoring the Moderator Temperature Coefficient of Pressurized Water Reactors: II. Experimental//Nucl. Sci. Eng. – 1991. – 108, 341.

4. *Зимаков В.Н., Витин С.П., Ефимов В.А.* Обзор экспериментальной базы для верификации интегрированных программных комплексов и анализ полноты использования полученных данных//ВАНТ. Сер.: Физика ядерных реакторов. – 1999. – Вып. 2. – С. 103-119.
5. *Владимиров В.И.* Практические задачи по эксплуатации ядерных реакторов (3-е изд.). – М.: Атомиздат, 1983.
6. *Хетрик Д.* Динамика ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1975.
7. *Виногоров Н.А., Жуковский Д.Н.* О методе определения физических характеристик ядерного реактора при медленном возмущении реактивности//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1999. – № 2. – С. 66-70.

Поступила в редакцию 21.08.2006

The quoted information touches upon goals and methods of loop tests in the MIR research reactor with the purpose of VVER fuel elements serviceability study in transitive and emergency modes (power cycling, RAMP, LOCA, RIA). Loop installations characteristics and their instrumental equipment are represented. The applied irradiation devices and sensors for measuring and determination of experimental parameters are listed. The developed instrumentation and installations are available for testing of VVER-type fuel at transient and project emergency conditions.

УДК 621.039.56

Reactivity Temperature Coefficient Measurement by the Dynamic Method under Non-equilibrium Xenon Concentration Conditions \ N.A. Vinogorov, Yu.A. Groznov, D.N. Jukovsky; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 7 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References – 7 titles.

Some methodical characteristic features of the application of the known method to measure the reactivity temperature coefficient under xenon transient conditions are considered.

The consideration is illustrated with the results obtained at pressurized water transportation-purpose reactor in the isothermal state.

УДК 621.039.543.6

Experiments in Support of MOX Fuel Disposal Program in VVER \ A.L. Kochetkov, I.P. Matveenko, E.V. Rojihin, A.M. Tsibulya; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 10 pages, 5 tables, 11 illustrations. – References – 10 titles.

Accordingly to the national program of neutronic experiments, needed for licensing of VVER-100 cores with MOX fuel, certification of calculational codes and the receiving of the national experience, at SSC RF IPPE site (Obninsk) the construction of SUPR facility is planned. Till the finalization of SUPR construction, the settle down of the experimental and calculational methods were carried out at MATR and RF-GS facilities. Now days, so called pre-SUPR experimental program is accomplished by experiments at BFS-1 facility. The results of these experiments and their analysis are presented.

УДК 621.534: 519.7

Statistical Analysis Data for Neutron Library of Activation Files «IEAF-2005» \ G.B. Pilnov, A.V. Tikhonenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 11 pages, 5 tables, 5 illustrations. – References – 5 titles.

Statistical analysis of experimental and theoretical data obtained with eight models for nuclei-nuclei interactions is executed as stage of establishment of neutron library of activation files «IEAF-2005» (The Intermediate Energy Activation File). Authors held a factor, correlation and least-square analyses for chosen of the best model describing experimental data. Analyses were made by using of EXFOR open experimental data of 2006 and 2007.

УДК 621.039.54

Regular Burnup Compensations Method to Locate Defected Fuel Assemblies on BN-600 Sodium Cooled Fast Reactors \ A.O. Skomorokhov, D.A. Lukyanov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 10 pages, 2 tables, 5 illustrations. – References – 5 titles.

The paper describes the method to locate failed fuel elements by using regular burnup compensations on BN-600 and BN-800 sodium cooled fast reactors. The functioning algorithms of FLUT-600 system on BN-600 reactor and the operation testing results are given.

УДК 621.039.51

Physics of fast reactor cores \ M.F. Troyanov, V.I. Matveev, M.N. Nickolaev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 15 pages. – References – 9 titles.

At present a new engineering science arose on the basis of numerous studies and developments in the area of fast reactors, which might be termed "Technical physics of fast reactor" based on fast reactor physics.

The paper gives a brief review of the main sections of this science including brief description of nuclear data and energy-group constants, based on neutron-physics characteristics of fast reactors BN-250, BN-600, BN-800, possibility of utilization of radioactive waste of nuclear power in fast reactors and oth.