

О МЕТОДЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ПРИ МЕДЛЕННОМ ВОЗМУЩЕНИИ РЕАКТИВНОСТИ

Н.А. Виногоров, Д.Н. Жуковский

*Научно-исследовательский технологический институт им. А.П.Александрова,
г. Сосновый Бор*



Представлен метод определения характеристик ядерного реактора при медленных возмущениях реактивности по измерениям параметра, обеспечивающего обратную связь.

Применение метода поясняется примерами определения эффекта отравления ксеноном-135 и барометрического коэффициента реактивности для ВВР.

В процессе эксплуатации энергетического ядерного реактора происходит постоянное изменение его параметров, обусловленное либо регламентными технологическими операциями, либо изменением состава топлива. Цель настоящей статьи - обратить внимание на информативность и возможность использования таких процессов для целей определения эффектов реактивности.

Рассмотрим качественно, как изменяется реактивность $\rho(t)$ реактора, работающего на энергетическом уровне мощности при возмущении реактивности $\rho_{in}(t)$ (источник возмущения значения не имеет). Будем рассматривать медленные процессы при малых значениях реактивности. Полагая, что обратная связь реализуется по эффективной температуре реактора, и считая, в частности, что выполняются условия

$$|d\rho/dt|/\lambda \ll \rho \ll \beta, \quad (1)$$

где β , λ - эффективная доля и постоянная распада (в одnogрупповом приближении) запаздывающих нейтронов соответственно, т.ч. состояние парогенератора можно принять квазистационарным, уравнения динамики системы запишем в упрощенном виде [1]:

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \rho_{in} + \rho_f \\ dn/dt &= \rho n / l \\ d\rho_f/dt &= \alpha_T dT/dt \\ dT/dt &= K(n - n_0) - \gamma T \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где ρ_f - реактивность обратной связи; T - отклонение температуры реактора от установившегося при начальной мощности n_0 значения; α_T - температурный коэффициент реактивности; λ , K , γ - размерные положительные постоянные.

Линеаризировав второе уравнение в (2) и применив операционный метод, при нулевых начальных условиях получим

$$F_p(s) = s(s + \gamma)D_s^{-1}F_{p_{in}}(s), F_{p_f}(s) = -AD_s^{-1}F_{p_{in}}(s), \quad (3)$$

где $F_p(s), F_{p_f}(s), F_{p_{in}}(s)$ - изображения Лапласа для p, p_f, p_{in} соответственно, s - комплексная переменная, $D_s = s^2 + s\gamma + A$, $A = -\alpha_i K n_0 / L$.

Корни уравнения $D_s = 0$ при характерных для реактора значениях параметров A и γ действительные и отрицательные, продолжительность переходных процессов составляет несколько минут, т.ч. в рассматриваемом случае реактор как объект управления представляет собой следящую систему [2]. При линейном во времени возмущении в системе установится процесс, в котором $p = \text{const} \neq 0$ и

$$dp_{in}/dt \equiv -dp_f/dt. \quad (4)$$

Уравнение (4) выражает метод определения скорости линейного возмущения реактивности, в соответствии с которым определяется скорость изменения параметра, обеспечивающего обратную связь. Предполагается, что коэффициент реактивности последнего (обычно температурный коэффициент) известен.

Особенность метода состоит, в частности, в том, что, будучи, по сути, методом динамическим, он не требует изменений реактивности реактора, характерных для динамических методов (соответственно, упрощается аппаратное обеспечение измерений и обработка данных).

Поскольку уравнение (4) представляет установившийся в системе баланс реактивности, рассматриваемый метод можно считать динамическим методом баланса.

В случае малых и медленных изменений параметров линейность процессов во времени позволяет обеспечить приемлемую точность измерений. Причинами линейного возмущения реактивности на интервалах в несколько десятков минут могут являться эффекты отравления, выгорания, изменения технологических параметров реактора. В частном случае, когда возмущение вносится изменением параметра X_i , так что $dp_{in}/dt = \alpha_i dX_i/dt$, одновременное определение скоростей изменения X_i и p_f позволяет определить коэффициент реактивности α_i .

Применение метода поясним (опуская детали методики) примерами, используя данные, полученные на водо-водяном реакторе транспортного назначения.

Пример 1. Определение отравления ксеноном-135. Пусть в исходном состоянии при мощности реактора N_1 достигнуто стационарное отравление ρ_{xe}^0 . Перевод реактора на другой стационарный уровень мощности N_2 инициирует переходный по ксенону процесс. Математическую модель процесса в приближении точечной кинетики для скорости отравления $d\rho_{xe}^0/dt$ можно записать в виде:

$$d\rho_{xe}^0/dt = A_1 \exp(-A_2 t) + A_3 \exp(-\lambda_1 t), \quad (5)$$

при этом для параметров модели A_1, A_2, A_3 справедливо:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \rho_{xe}^0 \left[\lambda_1^* \frac{N_2}{N_1} - \frac{\lambda_1^*}{\lambda_1 - \lambda_2^*} \frac{\gamma_I}{\gamma_I + \gamma_{xe}} \left(1 - \frac{N_2}{N_1} \right) \lambda_2^* - \lambda_2^* \right] \\ A_2 &= \rho_{xe}^0 \frac{\lambda_1^*}{\lambda_1 - \lambda_2^*} \frac{\gamma_I}{\gamma_I + \gamma_{xe}} \left(1 - \frac{N_2}{N_1} \right) \lambda_1 \\ A_3 &= \lambda_2^* \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

где γ_I, γ_{Xe} - соответственно выходы йода-135 и ксенона-135 при делении топлива; λ_I - постоянная распада I-135; λ_1^*, λ_2^* - «эффективные» постоянные распада ксенона-135 при уровнях мощности N_1 и N_2 .

Равенства (5) и (6) следуют из уравнений накопления йода и ксенона (см., например, [3]) в предположении пропорциональности между эффективной плотностью потока тепловых нейтронов и уровнем мощности.

Изменение некоторых параметров реактора на участке нестационарного по ксенону режима после увеличения мощности представлено на рис.1. Компенсация реактивности ведется системой реагирования релейного типа с механическими регуляторами. В динамике режима проявляются два основных процесса. Один процесс инициируется периодическим перемещением стержней регулирования. Внесенное стержнями возмущение реактивности относительно быстро компенсируется изменением температуры (скачки температуры на рис.1). Характерная длительность этого процесса 5-10 мин. [3]. Второй процесс - изменение отравления реактора ксеноном - идет непрерывно. Вносимое отравлением изменение реактивности также компенсируется изменением температуры. При больших периодах полураспада ксенона-135 и йода-135 на интервалах времени до десятков минут скорость изменения отравления можно принять постоянной. В течение 40-50 ч после изменения мощности реактора влияние на реактивность таких процессов как изменение отравления самарием-149 или выгорание топлива пренебрежимо мало по сравнению с влиянием отравления ксеноном. Определяя dT/dt на участках линейного изменения температуры, в соответствии с (4) получим на этих участках скорости изменения отравления ксеноном $dp_{Xe}/dt = -\alpha_T dT/dt$.

Экспериментальные данные, полученные таким образом, представлены на рис.2. Аппроксимация данных моделью (5) позволяет идентифицировать параметры модели, что, в свою очередь, позволяет из (6) определить величину стационарного отравления и рассчитать кинетику нестационарных ксеноновых процессов.

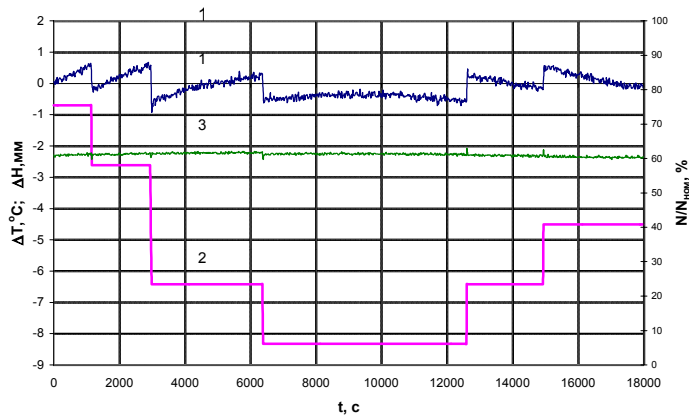


Рис.1. Изменение параметров реактора в нестационарном по ксенону режиме: 1 - отклонение ΔT средней температуры от заданного значения; 2 - изменение положения стержней регулирования ΔH ; 3 - нормированная мощность реактора $N/N_{ном}$

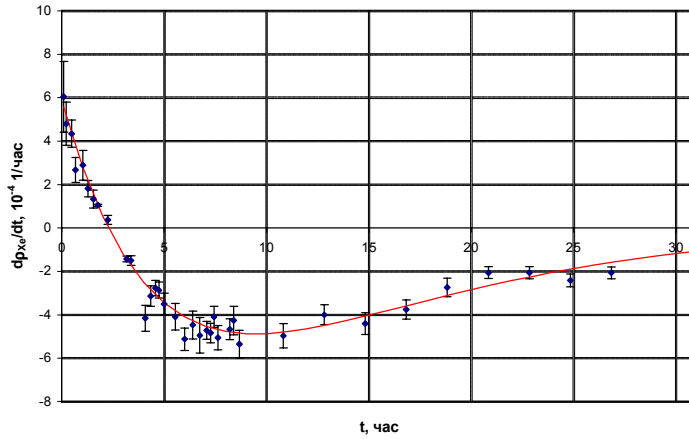


Рис.2. Скорость отравления ксеноном в переходном режиме после увеличения мощности реактора (измеренные значения и кривая их аппроксимации по модели (5))

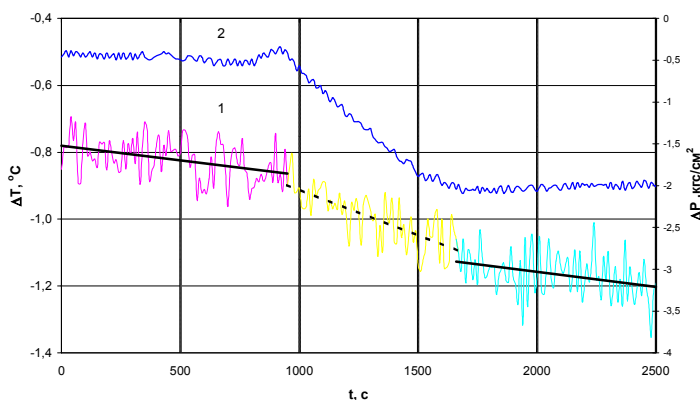


Рис.3. Изменение параметров реактора при дренаже теплоносителя:
1 - отклонение ΔT средней температуры от заданного значения, зарегистрированные данные и кусочно-линейная аппроксимация;
2 - отклонение ΔP давления от заданного значения

В реакторе под давлением изменение температуры сопровождается изменением давления. Если влияние последнего на реактивность существенно, величина α_T в рассматриваемом примере должна содержать "барометрическую составляющую", т.е. $\alpha_T = \alpha_T^0 + \alpha_P dP/dT$, где α_T^0 , α_P - собственно температурный и барометрический коэффициенты реактивности соответ-

ственно, P - давление.

Пример 2. Определение барометрического коэффициента реактивности α_P .

В соответствии с методом измерений для определения α_P необходимо обеспечить медленное линейное изменение давления. Эти требования можно выполнить при дренаже теплоносителя по линии отбора пробы на химический анализ. Скорость возмущения реактивности при дренаже не более (по абсолютной величине) $5 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$. Изменение параметров реактора при выполнении этой операции представлено на рис.3.

В иллюстрируемом режиме процесс дренажа накладывается на другой медленный процесс, индикатором которого является изменение температуры на начальном и конечном участках представленного на рисунке интервала. Возмущение реактивности, обусловленное падением давления, вызывает в этом случае изменение скорости уменьшения температуры. Определяя скорости изменения температуры до, после и при дренаже (соответственно dT^-/dt , dT^+/dt , dT/dt) и скорость изменения давления dP/dt получим в соответствии с (4) α_P из равенства

$$\alpha_P dP/dt = -\alpha_T [dT/dt - (dT^-/dt + dT^+/dt)/2].$$

Эксперименты по определению эффектов реактивности выполняются на разных стадиях создания и эксплуатации реактора. При этом измерения на действующих реакторах имеют свою специфику. Условия эксплуатации диктуют ряд требований к методам измерений. Желательно, чтобы наряду с информативностью они были экономичны и позволяли получать данные непосредственно на энергетических уровнях мощности в пассивном эксперименте (т.е. без специального, необходимого для целей эксперимента воздействия на реактор).

В настоящее время едва ли не единственным методом, отвечающим этим требованиям и широко используемым (в частности, для исследования температурного коэффициента реактивности), является метод анализа шумов параметров реактора. Из приведенных примеров следует, что проведение измерений в соответствии с рассматриваемым методом также полностью «вписывается» в режим нормальной эксплуатации.

Как уже отмечалось, измерения при медленном возмущении реактивности проводятся без определения реактивности реактора. Сравнивая представленные в примерах методики с традиционными [4], можно отметить, в частности, следующее:

- для определения отравления не требуется знания эффективности стержней регулирования, измерение которой на энергетических уровнях мощности представляет самостоятельную задачу, исключается необходимость введения поправок на мощностной и температурный эффекты реактивности;

- при определении барометрического коэффициента реактивности исключаются быстрые и значительные по величине изменения давления нехарактерные для режима нормальной эксплуатации.

Точность метода обусловлена, главным образом, погрешностями коэффициента реактивности контура обратной связи (обычно температурного коэффициента реактивности) и скоростей изменения параметров. В приведенных примерах малые скорости длительного линейного изменения давления и температуры определялись с относительной погрешностью ~10%, при относительной погрешности температурного коэффициента 7%. Таким образом, рассматриваемый метод по точности результатов не уступает другим методам, применяемым в настоящее время (см., например, [5]).

В заключение отметим, что, в случае, когда для стационарных по мощности режимов работы реактора известны предельные скорости возмущения реактивности, обусловленные отравлением и выгоранием, контроль скорости изменения реактивности обратной связи, по-видимому, можно использовать для мониторинга системы и индикации аварийных ситуаций.

Список литературы

1. Хетрик Д. Динамика ядерных реакторов. - М: Атомиздат, 1975.
2. Фельдбаум А.А., Дудыкин А.Д., Мановцев А.П., Миролюбов Н.Н. Теоретические основы связи и управления. - М: Изд-во физ.-мат. л-ры, 1963.
3. Саркисов А.А., Пучков В.Н. Физика переходных процессов в ядерных реакторах. - М.: Энергоатомиздат, 1983.
4. Аборина И.Н. Физические исследования реакторов ВВЭР. - М.: Атомиздат, 1978.
5. Терешонок В.А., Бережный В.В., Волков С.Е. и др. Температурный, мощностной и барометрический коэффициенты реактивности активной зоны ВВЭР-1000 с загрузкой двухлетнего топливного цикла. / В кн.: Внутренняя безопасность ядерно-энергетических установок: Тезисы докладов VII Всесоюзного семинара по проблемам физики реакторов (Москва, 3-7 сентября 1991 г.). - М.: ЦНИИ Атоминформ, 1991. - С. 50-52.

Поступила в редакцию 23.03.99.

interaction with atmospheric precipitation are chosen. Quantitative estimations of a ratio of these factors in the real atmosphere are given.

УДК 541.64:541.183

Study of Influence of Alkaline Hydrolysis Products in Production of Track Membranes on the Basis of Polyethyleneterephthalate Films \T.E. Laricheva, A.A. Machula, V.K. Milinchuk; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 5 pages, 3 illustrations. - References, 10 titles.

The influence of ethyleneglycol (EG) and terephthalate ions (TPI), generated during an alkaline hydrolysis of polyethyleneterephthalate films, on the process of formation of track membranes is investigated. It is shown that TPI do not influence on the velocity of chemical etching polymer and of the latent tracks (LT). At the same time the kinetics of chemical etching polymer and of the LT essentially depends on the concentration of EG in etching solution. As a result accumulation of EG in the etching solution the selectivity of the process becomes worse along with the change of characteristics of track membranes.

УДК 539.172.8

Study of Phase Distribution of Initial and Final States of Multiparticle Systems in the Monte-Carlo Method of Classical Trajectories \A.E. Yanovsky; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 9 pages, 14 illustrations. - References, 5 titles.

The results of calculation of phase distribution of reaction fragments simulated by three and four-particle models within the method of classical trajectories are represented in the paper.

УДК 621.039.525; 621.039.534.6

Universal Algorithm of the Monte-Carlo Method for Calculation of Blankets of Accelerator-Driven Systems \V.V. Korobeinikov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 7 pages, 2 illustrations. - References, 5 titles.

The universal algorithm for physical calculation of subcritical systems with an external source of neutrons by the Monte-Carlo method is developed. This algorithm is effective in calculation of accelerator-driven systems within a wide range of subcriticality. Description, theoretical evidence, method of realization, and results of testing of the algorithm for the test subcritical systems with an external neutron source are given in the paper.

УДК 621.039

On the Method of Determination of Physical Characteristics of a Nuclear Reactor under Slow Reactivity Perturbation \N.A. Vinogorov, D.N. Jukovsky; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 5 pages, 3 illustrations. - References, 5 titles.

The method of determination of nuclear reactor characteristics under slow reactivity perturbation by means of measurement of the parameter providing the feedback is presented.

The application of the method is demonstrated by examples of estimation of the poisoning effect of xenon-135 and barometric reactivity coefficient for VVR.

УДК 621.039.553.34

Study of Dependence of Wall Temperature in the Technological Channel of the RBMK-Reactor on the Gas Clearance between the channels and Graphite Blocks \A.I. Trofimov, S.A. Vinogradov, I.A. Tchusov, V.I. Belozerov, M.A. Trofimov, I.A. Shvetsov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 11 pages, 1 table, 15 illustrations. - References, 5 titles.

Theoretical and experimental proof of the usage of data on the temperature field distribution over the inner surface of a technological channel (TC) for evaluating the size of the gas clearance in RBMK-reactors are considered in the paper. The calculations performed using k- ϵ turbulence model, showed that the size of the gas clearance considerably affects the temperature distribution over the length of the TC.