

УДК 621.039.51

Методика определения коэффициентов реактивности и эффективности групп твердых поглотителей на аналитическом тренажере энергоблока ВВЭР-1000

В.К. Семенов, М.А. Вольман, А.А. Беляков
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: maria_volman@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Безопасный пуск и эксплуатация ядерной энергоустановки требует знания ее нейтронно-физических характеристик. Стандартная методика определения коэффициентов реактивности и эффективности групп твердых поглотителей требует проведения нескольких независимых экспериментов, в ходе каждого из которых варьируется один параметр процесса при поддержании остальных неизменными, что на практике удается осуществить весьма приближенно. Актуальным является поиск и разработка более простых и эффективных методик, не связанных с большим объемом экспериментов.

Материалы и методы: В основу разработанной методики положен математический анализ обращенных решений уравнений динамики ядерного реактора, позволяющий преодолеть ограничения стандартной методики. Для апробации методики использован аналитический тренажер энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000.

Результаты: Предложена нестандартная методика определения барометрического и температурных коэффициентов реактивности по температуре топлива и теплоносителя, а также интегральной и дифференциальной характеристик отдельных групп органов регулирования для топливной загрузки, моделируемой аналитическим тренажером. В отличие от стандартной методики, она основана на анализе динамического процесса, в котором реактивность, вводимая группой органов регулирования, и положительный барометрический эффект компенсируются температурными эффектами реактивности. Новая методика определения нейтронно-физических характеристик реактора ВВЭР-1000 апробирована на аналитическом тренажере.

Выводы: Методика не требует соблюдения условий по поддержанию отдельных параметров процесса и обеспечивает возможность расчета нейтронно-физических характеристик с требуемой точностью более простым способом и позволяет значительно сократить число экспериментов и упростить процедуру их проведения. Предлагаемая методика внедрена в учебный процесс по подготовке специалистов для АЭС.

Ключевые слова: атомный блок, водо-водяной энергетический реактор, коэффициент реактивности, интегральные и дифференциальные характеристики органов регулирования, математическое моделирование, численные эксперименты, компьютерные тренажеры, нейтронно-физические измерения.

A method for determination of reactivity coefficients and efficiency of solid absorbers on a WWER-1000 computer simulator

V.K. Semenov, M.A. Volman, A.A. Belyakov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: maria_volman@mail.ru

Abstract

Background: Safe startup and operation of a nuclear reactor are only possible if its neutronic characteristics are known. The standard method of determining reactivity coefficients and efficiency of solid absorber groups consists of several independent experiments. In each of them, one process parameter is changed, with the other parameters remaining constant, which can be only achieved approximately in practice. All this makes it urgent to develop simpler and more effective techniques not requiring a lot of experiments.

Materials and methods: The developed method is based on mathematical analysis of inverse solutions to nuclear reactor dynamics equations and has been tested on a computer simulator of the generating unit with a WWER-1000 reactor.

Results: We have proposed a non-standard method for determining barometric and temperature reactivity coefficients by the fuel and coolant temperature, and the integral and differential characteristics of individual groups of control elements for computer-simulated fuel loading. Unlike the standard method, this one is based on analyzing the dynamic process, in which the reactivity introduced by the control elements and the positive barometric effect are compensated for by the reactivity temperature effects. The developed method of determining the neutronic characteristics of the WWER-1000 reactor has been tested on a computer simulator.

Conclusions: The new method can be used without maintaining individual parameters of the process and makes it possible to calculate the neutronic characteristics with required accuracy in a simpler way and thus to reduce the number of experiments and make them simpler too. The proposed method has been introduced into the curriculum for training specialists for nuclear power plants.

Key words: NPP, WWER, reactivity coefficient, integral and differential characteristics of control elements, mathematical modeling, numerical experiments, computer simulators, neutronic measurements.

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.1.019-024

Введение. В соответствии с правилами ядерной безопасности реакторных установок атомных станций в процессе физического и энергетического пусков, а также после завершения перегрузок должны быть получены экспериментальные данные о нейтронно-физических параметрах реактора, эффектах реактивности, эффективности органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ), аварийной защиты и др. Объем, методики и порядок проведения физических экспериментов, а также методики расчета по данным экспериментов нейтронно-физических характеристик установлены соответствующими руководящими документами¹. В соответствии с ними, стандартная методика определения коэффициентов реактивности на энергетических уровнях мощности заключается в следующем.

При постоянном отравлении реактора ксеноном и самарием и неизменной концентрации борной кислоты изменение реактивности реактора при малых возмущениях определяется выражением [1]

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right) \Delta T_{\text{в}} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial N}\right)_{\text{АЗ}} \Delta N + \left(\frac{\partial \rho}{\partial P}\right) \Delta P_1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial H}\right) \Delta H = 0, \quad (1)$$

где $\frac{\partial \rho}{\partial T}$ – суммарный температурный коэффициент реактивности по температуре топлива T_u и теплоносителя $T_{\text{в}}$; $\Delta T_{\text{в}}$ – изменение температуры теплоносителя; $\left(\frac{\partial \rho}{\partial N}\right)_{\text{АЗ}}$ – мощностной коэффициент реактивности при постоянной температуре теплоносителя в активной зоне; ΔN – изменение нейтронной мощности реактора; $\frac{\partial \rho}{\partial P}$ – барометрический коэффициент реактивности; ΔP_1 – изменение давления в первом контуре P_1 ; $\frac{\partial \rho}{\partial H}$ – дифференциальная эффективность группы органов регулирования; ΔH – изменение положения группы органов регулирования по высоте в активной зоне H .

Далее рассматриваются отдельно: возмущение реактора изменением температуры теплоносителя на входе в реактор $\Delta T_{\text{в}}$ при постоянных P_1 и H ; возмущение изменением давления в первом контуре при неизменном положении ре-

гулирующей группы и возмущение изменением положения регулирующей группы при постоянстве давления в первом контуре.

В результате получается система трех уравнений с четырьмя неизвестными. Для замыкания системы уравнений выполняется еще один эксперимент по определению $\frac{\partial \rho}{\partial H}$. Осуществить

указанные эксперименты при варьировании одних параметров и поддержании других неизменными весьма непросто.

С одной стороны, ведутся разработки способов учета в известной методике различных вторичных факторов [1, 2], с другой стороны, актуальным является создание новых методик, не связанных с указанными ограничениями.

Методы исследования. Для апробации предлагаемой нами новой методики использовался полномасштабный аналитический тренажер, являющийся компьютерной математической моделью атомного энергоблока. Эта модель приближенно описывает физику процессов, происходящих в реальном объекте. Тренажеры применяются не только для обучения персонала существующим методикам физических экспериментов, но могут использоваться для разработки и апробации новых методик измерений до выхода на реальные объекты.

Применяемый аналитический тренажер является программным продуктом ООО «Вестерн Сервисез», он реализован на персональном компьютере в программной среде 3KeyMaster^{TM2}. В его основе лежит моделирование нейтронно-физических, тепломеханических, теплофизических и других процессов и, как следствие, построение модели функционирования энергоблока в различных режимах в реальном времени.

Заложенная в аналитический тренажер математическая модель позволяет провести расчет динамики процессов как в прямом направлении, когда по известным условиям рассчитываются динамические характеристики объекта, так и построить так называемые обращенные решения, когда по известным динамическим характеристикам можно определить правые части дифференциальных уравнений и заложенные в них условия. Примером тому является известное обращенное решение уравнений кинетики реактора, позволяющее построить реактиметр – прибор, с помощью которого рассчитывается реактивность реактора. Эта математическая модель оказалась столь успешной, что ее с определенными мерами и ограничениями удалось применить к реальному объекту [3–5]. Обращенное решение уравнений кинетики нашло применение и в расчетах

¹ Методики расчета нейтронно-физических характеристик по данным физических экспериментов на энергоблоках атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000. – М.: Концерн «Росэнергоатом», 2005. – 101 с.; Типовые программы и методики проведения физических экспериментов на энергоблоках атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000. – М.: Концерн «Росэнергоатом», 2005. – 273 с.

² Western Services Corporation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ws-corp.com> (дата обращения: 01.10.2017)

эффективности аварийной защиты реакторов ВВЭР-1000 [6].

Результаты исследования. Ниже приводится разработанная нами методика нейтронно-физических измерений для моделируемой аналитическим тренажером топливной загрузки. Она отличается от стандартной тем, что не требует проведения нескольких экспериментов с поддержанием тех или иных параметров реакторной установки на неизменном уровне.

Рассмотрим переходный процесс, в ходе которого реактор переводится из одного стационарного состояния в другое стационарное состояние за счет погружения регулирующей группы в активную зону с рабочей скоростью на небольшую величину (порядка 3–4 % от высоты зоны) при постоянном отравлении реактора ксеноном и самарием и неизменной концентрации борной кислоты на энергетическом уровне мощности и при отключенном автоматическом регуляторе мощности (АРМ) (рис. 1).

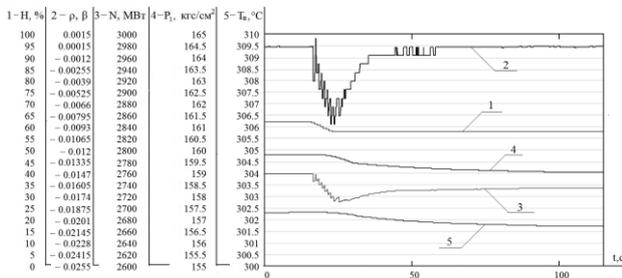


Рис. 1. Графики, полученные на аналитическом тренажере при погружении регулирующей группы: 1 – положение 10-й группы ОР СУЗ; 2 – реактивность в единицах β (доля запаздывающих нейтронов); 3 – нейтронная мощность; 4 – давление в первом контуре; 5 – температура теплоносителя

Изменение реактивности реактора Δρ в ходе этого процесса имеет вид

$$\Delta\rho(t) = \Delta\rho_{СУЗ}(t) + \alpha_1(T_u(t) - T_u(0)) + \alpha_2(T_B(t) - T_B(0)) + \alpha_3(P_1(t) - P_1(0)), \quad (2)$$

где $T_u(t)$, $T_B(t)$, $P_1(t)$ – зависимости от времени температуры топлива, температуры теплоносителя в реакторе и давления в первом контуре соответственно; $T_u(0)$, $T_B(0)$, $P_1(0)$ – значения этих параметров в первоначальном стационарном состоянии; α_1 , α_2 , α_3 – коэффициенты реактивности по температуре топлива, теплоносителя и по давлению теплоносителя в первом контуре соответственно.

Зависимости $\Delta\rho(t)$, $T_B(t)$ и $P_1(t)$ определяются непосредственно из эксперимента. Зависимость $\Delta\rho_{СУЗ}(t)$ определим тоже из эксперимента следующим образом. При переходе из начального стационарного состояния в конечное стационарное состояние выполняется условие $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 = 0$ (рис. 2), поэтому максимальный эффект реактивности, обусловленный погружением группы, определится следующим условием:

$$\Delta\rho_{СУЗ\max}(t) = \alpha_1(T_u(0) - T_u(t_k)) + \alpha_2(T_B(0) - T_B(t_k)) + \alpha_3(P_1(0) - P_1(t_k)), \quad (3)$$

где t_k – момент времени, когда достигнуто конечное стационарное состояние.

Поскольку погружение группы в активную зону идет с постоянной скоростью, то

$$\Delta\rho_{СУЗ}(t) = \frac{\Delta\rho_{СУЗ\max}}{t_1} \cdot t, \quad (4)$$

где t_1 – время погружения группы в активную зону. При $t \geq t_1$ $\Delta\rho_{СУЗ} = \Delta\rho_{СУЗ\max}$.

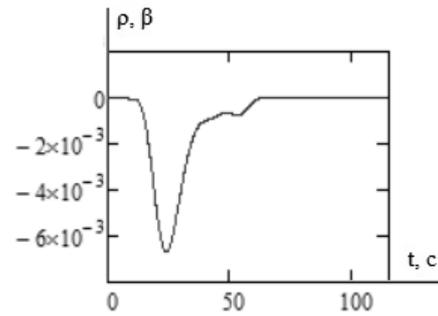


Рис. 2. Зависимость реактивности в единицах β (доля запаздывающих нейтронов) от времени в переходном процессе, обусловленном погружением регулирующей группы

Входящая в уравнение (2) зависимость температуры топлива от времени непосредственно в эксперименте не определяется, ее можно найти из уравнения теплового баланса

$$m_u c_u \frac{dT_u}{dt} = N(t) - kF(T_u(t) - T_B(t)), \quad (5)$$

решение которого выражается в квадратурах

$$T_u(t) = T_u(0)e^{-\frac{t}{\tau_u}} + \frac{e^{-\frac{t}{\tau_u}}}{m_u c_u} \int_0^t N(t')e^{\frac{t'}{\tau_u}} dt' + \frac{e^{-\frac{t}{\tau_u}}}{\tau_u} \int_0^t T_B(t')e^{\frac{t'}{\tau_u}} dt', \quad (6)$$

где $N(t)$ – зависимость нейтронной мощности реактора от времени; k , F – коэффициент теплоотдачи и поверхность теплоотдачи соответственно; m_u , C_u – масса, удельная теплоемкость топлива соответственно; $\tau_u = \frac{m_u C_u}{kF} = 3,6 \div 4,2$ с – характерное время теплопередачи от топлива к теплоносителю.

Нахождение искомых коэффициентов реактивности осуществляется по методу наименьших квадратов. Для этого рассмотрим часть динамического процесса начиная с того момента времени t_1 , когда погружение группы в зону закончено, т.е. группой введена максимальная для данного процесса отрицательная реактивность $\Delta\rho_{СУЗ\max}$. Далее зависимость реактивности от времени $\Delta\rho(t)$ определяется только температурными и барометрическими эффектами реактив-

ности. На основании (2) и (3) эту зависимость представим в виде

$$\Delta\rho(t) = \alpha_1\Delta T_U(t) + \alpha_2\Delta T_B(t) + \alpha_3\Delta P_1(t), \quad (7)$$

где $\Delta T_U(t) = T_U(t) - T_U(t_k)$, $\Delta T_B(t) = T_B(t) - T_B(t_k)$, $\Delta P_1(t) = P_1(t) - P_1(t_k)$.

Далее в соответствии с (7) составим функционал

$$I(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = \int_{t_1}^{t_k} [\Delta\rho(t) - \alpha_1\Delta T_U(t) - \alpha_2\Delta T_B(t) - \alpha_3\Delta P_1(t)]^2 dt, \quad (8)$$

минимизируя который по параметрам α , получим систему трех алгебраических уравнений, определяющих искомые коэффициенты реактивности:

$$\int_{t_1}^{t_k} [\Delta\rho(t) - \alpha_1\Delta T_U(t) - \alpha_2\Delta T_B(t) - \alpha_3\Delta P_1(t)] \Delta T_B(t) dt = 0; \quad (9)$$

$$\int_{t_1}^{t_k} [\Delta\rho(t) - \alpha_1\Delta T_U(t) - \alpha_2\Delta T_B(t) - \alpha_3\Delta P_1(t)] \Delta T_U(t) dt = 0; \quad (10)$$

$$\int_{t_1}^{t_k} [\Delta\rho(t) - \alpha_1\Delta T_U(t) - \alpha_2\Delta T_B(t) - \alpha_3\Delta P_1(t)] \Delta P_1(t) dt = 0. \quad (11)$$

Для удобства вычислений полученные из эксперимента зависимости реактивности, температуры теплоносителя и давления в первом контуре от времени аппроксимировались полиномиальными функциями на основании регрессионного анализа.

Эффективность группы может быть определена как в ходе ступенчатого погружения группы в серии переходов из одного стационарного состояния в другое, аналогично рассмотренному выше, так и в динамическом процессе погружения группы на всем интервале изменения ее положения в активной зоне без передачи группового движения (рис. 3).

Для динамического процесса погружения регулирующей группы от верхнего конечного выключателя (ВКВ) до нижнего (НКВ) зависимость $\Delta\rho_{СУЗ}(t)$ определяется формулой (2):

$$\Delta\rho_{СУЗ}(t) = \Delta\rho(t) - \alpha_1(T_U(t) - T_U(0)) - \alpha_2(T_B(t) - T_B(0)) - \alpha_3(P_1(t) - P_1(0)). \quad (12)$$

Зная из предыдущих экспериментов коэффициенты реактивности и зависимости всех функций правой части от времени, можно найти $\Delta\rho_{СУЗ}(t)$. Поскольку группа погружается в зону с постоянной скоростью (2 см/с), можно перейти от зависимости $\Delta\rho(t)$ к зависимости $\Delta\rho(H)$ и тем самым построить интегральную характеристику группы. Далее, аппроксимировав полученную зависимость аналитической функцией и продифференцировав ее, найдем и дифференциальную характеристику группы.

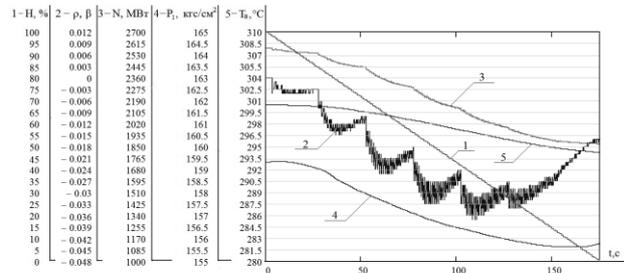


Рис. 3. Графики, полученные на аналитическом тренажере при погружении регулирующей группы в целях определения ее эффективности: 1 – положение 10-й группы ОР СУЗ; 2 – реактивность в единицах β (доля запаздывающих нейтронов); 3 – нейтронная мощность; 4 – давление в первом контуре; 5 – температура теплоносителя

В качестве примера на рис. 4, 5 приведены соответственно интегральная и дифференциальная характеристики регулирующей группы на энергетическом уровне мощности, полученные по стандартной и разработанной нами методикам.

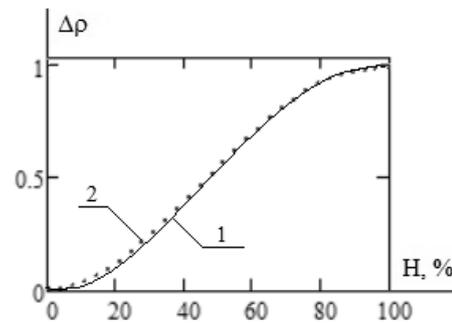


Рис. 4. Интегральная характеристика 10-й группы органов регулирования в безразмерном виде: 1 – результаты, полученные по стандартной методике; 2 – результаты, полученные по новой методике

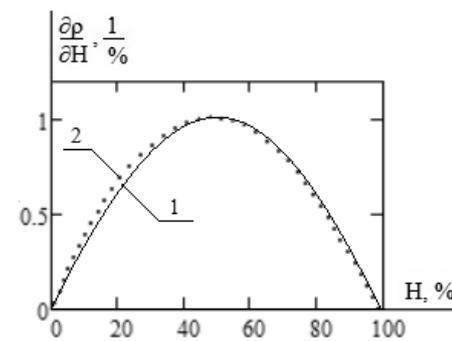


Рис. 5. Дифференциальная характеристика 10-й группы органов регулирования в безразмерном виде: 1 – результаты, полученные по стандартной методике; 2 – результаты, полученные по новой методике

Выводы. Таким образом, для топливной загрузки, моделируемой аналитическим тренажером, рассматривается нестандартная методика определения барометрического и температурных коэффициентов реактивности по температуре топлива и теплоносителя, а также интегральной и дифференциальной характеристик отдельных групп ОР СУЗ. В отличие от стандартной методи-

ки, требующей проведения нескольких независимых экспериментов, в ходе каждого из которых варьируется один параметр процесса при подержании остальных неизменными при переходе из одного стационарного состояния в другое, предлагаемая методика соблюдения таких условий не требует и основывается на анализе динамического процесса, в котором реактивность, вводимая группой ОР СУЗ, и положительный барометрический эффект компенсируются температурными эффектами реактивности. Предлагаемая методика апробирована на аналитическом тренажере энергоблока с реактором ВВЭР-1000. Все результаты согласуются с результатами экспериментов, выполненных по стандартным методикам руководящих документов.

Список литературы

1. **Виногоров Н.А., Грознов Ю.А., Жуковский Д.Н.** Измерение температурного коэффициента реактивности динамическим методом в условиях нестационарной концентрации ксенона // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – № 3–1. – С. 92–98.
2. Изменение температурного коэффициента реактивности в легководных реакторах при выгорании топлива / А.Д. Климов, В.Д. Давиденко, В.Ф. Цибульский, С.В. Цибульский // Атомная энергия. – 2014. – Т. 116, № 1. – С. 3–5.
3. **Казанский Ю.А., Слекеничс Я.В.** Кинетика ядерных реакторов. Коэффициенты реактивности. Введение в динамику: учеб. пособие. – М.: МИФИ, 2012. – 300 с.
4. **Кошелев А.С., Арапов А.В., Овчинников М.А.** О возможности создания специализированного ОРУК-реактиметра с токовым детектором нейтронов // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика ядерных реакторов. – 2015. – № 4. – С. 39–48.
5. **Колесов В.Ф.** Истоки неточностей в реактивности, определяемой с помощью обращенного решения уравнений кинетики // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика ядерных реакторов. – 2013. – № 3. – С. 30–45.
6. **Зизин М.Н., Иванов Л.Д.** О трактовке обращенного уравнения кинетики и пространственно-временных расчетов эффективности аварийной защиты ВВЭР-1000 // Вопросы атомной науки и техники.

Семенов Владимир Константинович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры атомных электрических станций,
телефон +7 (4932) 38-57-78,
e-mail: semenov_vk@mail.ru

Semenov Vladimir Konstantinovich,

Ivanovo State Power Engineering University,
Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral Degree), Professor of the Nuclear Power Plants Department,
telephone +7 (4932) 38-57-78,
e-mail: semenov_vk@mail.ru

Вольман Мария Андреевна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
старший преподаватель кафедры атомных электрических станций,
телефон +7 (4932) 26-97-17,
e-mail: maria_volman@mail.ru

Сер.: Физика ядерных реакторов. – 2012. – № 2. – С. 28–43.

References

1. Vinogorov, N.A., Groznov, Yu.A., Zhukovsky, D.N. Izmerenie temperaturnogo koeffitsienta reaktivnosti dinamicheskim metodom v usloviyakh nestatsionarnoy kontsentratsii ksenona [Measurement of the temperature coefficient of reactivity by the dynamic method under conditions of non-stationary xenon concentration]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika*, 2007, no. 3–1, pp. 92–98.
2. Klimov, A.D., Davidenko, V.D., Tsibulsky, V.F., Tsibulsky, S.V. Izmenenie temperaturnogo koeffitsienta reaktivnosti v legkovodnykh reaktorakh pri vygoranii topliva [Changing the temperature coefficient of reactivity in light water reactors at fuel burnup]. *Atomnaya energiya*, 2014, vol. 116, no. 1, pp. 3–5.
3. Kazansky, Yu.A., Sledenichs, Ya.V. *Kinetika yadernykh reaktorov. Koeffitsienty reaktivnosti. Vvedenie v dinamiku* [Kinetics of nuclear reactors. Reactivity coefficients. Introduction to dynamics: a training aid]. Moscow, MIFI, 2012. 300 p.
4. Koshelev, A.S., Arapov, A.V., Ovchinnikov, M.A. O vozmozhnosti sozdaniya spetsializirovannogo ORUK-reaktimetra s tokovym detektorom neytronov [On the possibility to develop a specialized reactimeter based on inverse solution to kinetics equations with a current detector of neutrons]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov*, 2015, no. 4, pp. 39–48.
5. Kolesov, V.F. Istoki netochnostey v reaktivnosti, opredelyaemoy s pomoshch'yu obrashchennogo resheniya uravneniy kinetiki [Reasons for inaccuracies in determining reactivity by an inverse solution to kinetics equations]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov*, 2013, no. 3, pp. 30–45.
6. Zizin, M.N., Ivanov, L.D. O traktovke obrashchennogo uravneniya kinetiki i prostranstvenno-vremennykh raschetov effektivnosti avariynoy zashchity VVER-1000 [On the Interpretation of the Inverse Equation of Kinetics and Space-Time Calculations of the WWER-1000 Reactor Scram System Effectiveness]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov*, 2012, no. 2, pp. 28–43.

Volman Maria Andreyevna,
Ivanovo State Power Engineering University,
Senior Lecturer of the Nuclear Power Plants Department,
telephone +7 (4932) 26-97-17,
e-mail: maria_volman@mail.ru

Беляков Андрей Александрович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры атомных электрических станций,
телефон +7 (4932) 26-99-15,
e-mail: bel@aes.ispu.ru
Belyakov Andrei Aleksandrovich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Nuclear Power Plants Department,
telephone +7 (4932) 26-99-15,
e-mail: bel@aes.ispu.ru