

## ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ РЕАКТИВНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ТВЕРДЫХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ ТОЧЕЧНОГО РЕАКТОРА

© 2018 В.К. Семенов, М.А. Вольман

*Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, Иваново, Россия*

На основе сравнения результатов решения прямой и обратной задачи динамики точечного ядерного реактора произведена оценка точности методики определения коэффициентов реактивности и эффективности твердых поглотителей, апробированной на полномасштабном компьютерном имитаторе энергоблока с реактором ВВЭР-1000. Показано, что оптимизационный метод решения обратной задачи динамики реактора обладает хорошей точностью.

*Ключевые слова:* эффекты и коэффициенты реактивности, обращенные решения, динамика реактора, численные эксперименты, точечный реактор, метод оптимизации.

Поступила в редакцию 25.06.2018 г.

В процессе эксплуатации ядерного реактора производится экспериментальное уточнение его нейтронно-физических характеристик, в частности, коэффициентов реактивности и эффективности групп твердых поглотителей. Эксперименты проводятся на основе стандартной методики, суть которой состоит в следующем [1, 2]. При постоянном отравлении реактора ксеноном и самарием и неизменной концентрации борной кислоты изменение реактивности реактора при малых возмущениях определяется выражением:

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right) \Delta T_{\text{в}} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial N}\right)_{\text{АЗ}} \Delta N + \left(\frac{\partial \rho}{\partial p_1}\right) \Delta p_1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial H}\right) \Delta H = 0. \quad (1)$$

где  $\frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{\partial \rho}{\partial T_{\text{в}}} + \frac{\partial \rho}{\partial T_{\text{у}}}$  – суммарный температурный коэффициент реактивности по температуре топлива  $T_{\text{в}}$  и теплоносителя  $T_{\text{у}}$ ;

$\left(\frac{\partial \rho}{\partial N}\right)_{\text{АЗ}} = \frac{\partial \rho}{\partial T_{\text{у}}} \frac{1}{kF}$  – мощностной коэффициент реактивности при постоянной температуре теплоносителя в активной зоне;

$N$  – нейтронная мощность реактора;

$k$  – эффективный коэффициент теплопередачи от топлива к теплоносителю;

$F$  – эффективная поверхность теплообмена;

$\frac{\partial \rho}{\partial p_1}$  – барометрический коэффициент реактивности;

$p_1$  – давление теплоносителя в первом контуре;

$\frac{\partial \rho}{\partial H}$  – дифференциальная эффективность группы органов регулирования;

$H$  – положение регулирующей группы.

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 регулирующей 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 отдельный эксперимент по определению коэффициента  $\frac{\partial \rho}{\partial N}$ . Осуществить указанные эксперименты при варьировании одних параметров и поддержании других неизменными весьма непросто.

Нами предлагается другая методика определения вышеназванных характеристик, основанная на решении обратной задачи динамики реактора методом оптимизации. [3, 4] Решение обратной задачи динамики реактора позволяет найти входные параметры модели по имеющимся выходным динамическим характеристикам, полученным экспериментально. Примером успешной реализации подобного подхода является известное обращенное решение уравнений кинетики реактора, позволяющее построить реактиметр – прибор, с помощью которого рассчитывается реактивность реактора. Эту математическую модель с определенными мерами и ограничениями удалось применить к реальному объекту [5–7]. Обращенное решение уравнений кинетики нашло применение и в расчётах эффективности аварийной защиты реакторов ВВЭР-1000 [8].

Оценку точности метода проведем на основе численного эксперимента, основанного на решении прямой задачи с известными коэффициентами реактивности и известным законом возмущения реактора по реактивности. На основе полученных решений методом оптимизации решим обратную задачу по нахождению значений введенной реактивности и коэффициентов реактивности. Сравнение полученных значений с входными параметрами этих величин, заданными в прямой задаче, позволит оценить точность предлагаемой методики.

В качестве объекта моделирования будем иметь в виду реактор ВВЭР-1000. Для реактора с сосредоточенными параметрами (точечный реактор) математическая модель может быть представлена следующей системой нелинейных жестких дифференциальных уравнений [5]:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\delta\rho(t) + \alpha_1(T_u - T_u(0)) + \alpha_2(T_B - T_B(0)) - \beta}{\tau_m} N + \sum_{j=1}^6 \lambda_j N_j, \quad (2)$$

$$\frac{dN_j}{dt} = \frac{\beta_j}{\tau_m} N - \lambda_j N_j, \quad j = 1, \dots, 6, \quad (3)$$

$$m_u C_u \frac{dT_u}{dt} = N - kF(T_u - T_B), \quad (4)$$

$$m_B C_B \frac{dT_B}{dt} = kF(T_u - T_B) - \gamma_B C_B G(T_{\text{ВЫХ}} - T_{\text{ВХ}}). \quad (5)$$

где  $N$  – нейтронная мощность реактора;

$N_j$  – мощность, вносимая  $j$ -ой группой запаздывающих нейтронов ( $j = 1, \dots, 6$ );

$\beta_j$  и  $\lambda_j$  – соответственно доля запаздывающих нейтронов и постоянная времени распада ядер-предшественников  $j$ -ой группы;

$\beta = \sum_j \beta_j$  – суммарная доля запаздывающих нейтронов;

$\tau_m$  – приведенное время жизни одного поколения мгновенных нейтронов;

$m_u$  и  $c_u$  – соответственно масса и удельная теплоемкость топливной загрузки;

$k, F, T_u$  – соответственно коэффициент теплоотдачи, поверхность теплоотдачи и температура топлива;

$T_B, T_{\text{ВЫХ}}$  и  $T_{\text{ВХ}}$  – соответственно средняя температура теплоносителя, температура на выходе и входе в реактор;

$\gamma_B, C_B, G$  – соответственно плотность, удельная теплоемкость теплоносителя при постоянном давлении и расход теплоносителя;

$\delta\rho(t)$  – внешнее возмущение реактора по реактивности;

$\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – соответственно температурные коэффициенты реактивности по температуре топлива и теплоносителя.

Поскольку уравнения записаны для точечного реактора, то, тем самым, предполагается, что за время переходного процесса пространственное распределение нейтронного поля реактора не успевает заметно измениться. Во-вторых, также считается, что за время протекания вышеназванных процессов не изменяются концентрация борной кислоты и отравление реактора ксеноном и самарием. В последнем уравнении необходимо указать связь между указанными тремя температурами теплоносителя. Как показал проведенный нами анализ, с достаточной степенью точности можно воспользоваться соотношением [9]:

$$T_B = \frac{T_{\text{ВЫХ}} + T_{\text{ВХ}}}{2}. \quad (6)$$

Дополняя уравнения (2–6) соответствующими начальными условиями:

$$N = N_0, N_j = \frac{\beta_j N_0}{\tau \lambda_j}, T_u = T_u(0), T_B = T_B(0), T_{\text{ВХ}} = T_{\text{ВХ}}(0) \text{ и } \delta\rho(t), \quad (7)$$

можно найти зависимости всех динамических величин от времени при заданном законе изменения реактивности реактора  $\delta\rho(t)$ .

В качестве примера на рисунках 1-5 приведены расчетные кривые при переводе реактора на более низкий уровень мощности за счет введения отрицательной реактивности  $\delta\rho(t) = -1,21 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - \exp(-0,5t))$  за время  $t_1 = 20$  с, имитирующей действие твердых поглотителей. Принятые для расчета значения коэффициентов реактивности имели следующие значения:  $\alpha_1 = -1,22 \cdot 10^{-5}$  1/К и  $\alpha_2 = -1,00 \cdot 10^{-4}$  1/К.

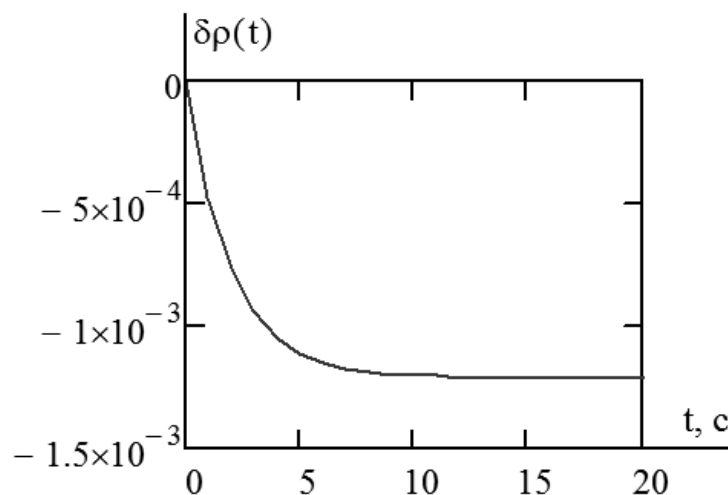


Рисунок 1 – Возмущение реактора введенной реактивностью [The perturbation of the reactor by the introduced reactivity]

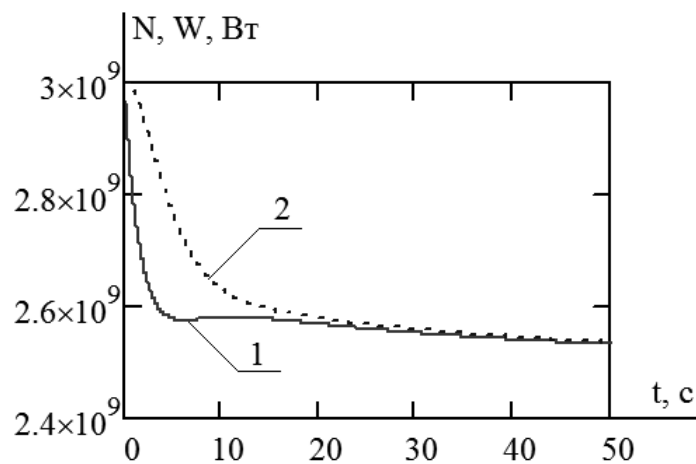


Рисунок 2 – Зависимость мощности реактора от времени на начальной стадии:  
 1 – нейтронная мощность; 2 – тепловая мощность [Dependence of reactor power on time at the initial stage:  
 1 - neutron power; 2 - thermal power]

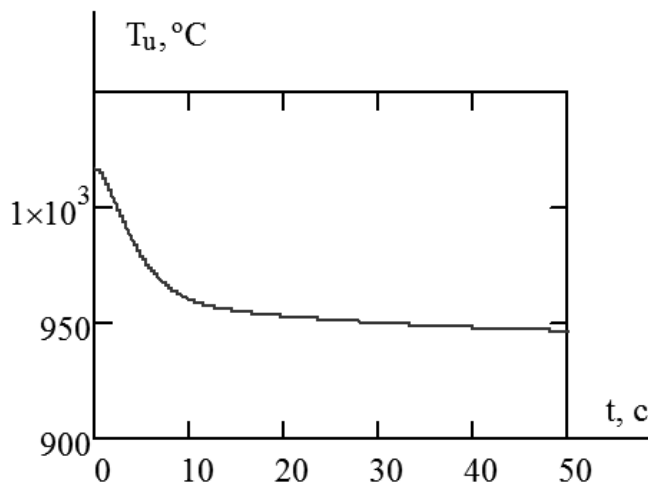


Рисунок 3 – Зависимость температуры топлива от времени на начальной стадии [Fuel temperature versus time in the initial stage]

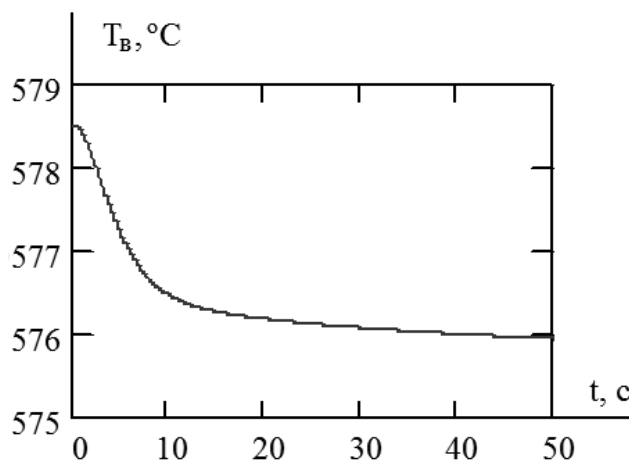


Рисунок 4 – Зависимость температуры теплоносителя от времени на начальной стадии [Temperature dependence of the coolant temperature at the initial stage]

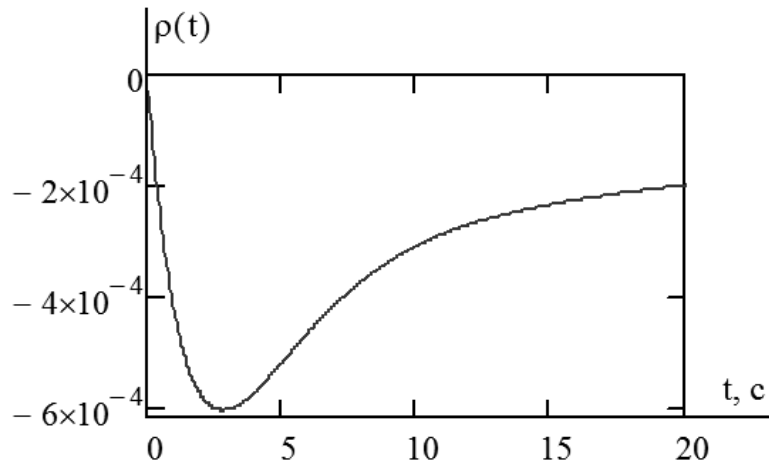


Рисунок 5 – Зависимость реактивности реактора от времени на начальной стадии процесса [Dependence of reactivity of the reactor on time at the initial stage of the process]

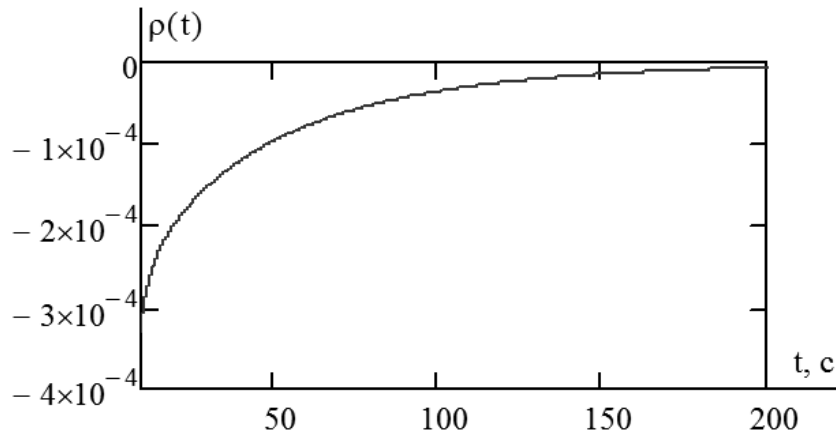


Рисунок 6 – Зависимость реактивности реактора от времени после окончания ввода возмущения [Dependence of reactivity of the reactor on time at the initial stage of the process]

Далее по полученным результатам решим обратную задачу. Вначале найдем максимальное значение введенной отрицательной реактивности. Так как реактор переводится из одного стационарного состояния в другое стационарное состояние, то введенная максимальная реактивность  $\delta\rho(t_1)$  компенсируется температурными эффектами реактивности:

$$\delta\rho(t_1) = \alpha_1(T_u(0) - T_u(t_k)) + \alpha_2(T_B(0) - T_B(t_k)). \quad (8)$$

где  $t_k$  – время окончания переходного процесса, равное в нашем примере 400 с.

Зависимость полной реактивности реактора от времени, от момента  $t_1$  до окончания переходного процесса  $t_k$ , определяется выражением:

$$\Delta\rho(t) = \alpha_1\Delta T_u(t) + \alpha_2\Delta T_B(t), \quad (9)$$

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

Решая задачу оптимизации, составим функционал:

$$I(\alpha_1, \alpha_2) = \int_{t_1}^{t_k} [\Delta\rho(t) - \alpha_1 \Delta T_u(t) - \alpha_2 \Delta T_B(t)]^2 dt, \quad (10)$$

минимизируя который по параметрам  $\alpha$ , получим систему двух алгебраических уравнений, определяющих искомые коэффициенты реактивности:

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

$$\int_{t_1}^{t_k} [\Delta\rho(t) - \alpha_1 \Delta T_u(t) - \alpha_2 \Delta T_B(t)] \Delta T_u(t) dt = 0. \quad (12)$$

Вычислив соответствующие интегралы, и решив уравнения (11) и (12), получили значения  $\alpha_1 = -1,22 \cdot 10^{-5} \text{ 1/К}$  и  $\alpha_2 = -1,00 \cdot 10^{-4} \text{ 1/К}$ , что полностью совпадает со входными параметрами. Подставляя найденные значения коэффициентов реактивности и рассчитанные температуры в формулу (8), получим  $\delta\rho_{\text{макс}} = \delta\rho(t) = -1,209 \cdot 10^{-3}$ , что также с хорошей точностью согласуется со входной реактивностью  $-1,21 \cdot 10^{-3}$ . Численные эксперименты, выполненные для других значений коэффициентов реактивности и значений  $\delta\rho(t)$  также показывают хорошее согласие результатов решения прямой и обратной задачи.

Различного рода тренажеры в настоящее время нашли широчайшее применение [10–14], причем они могут использоваться не только для обучения персонала существующим методикам физических экспериментов, но и для разработки и апробации новых методик измерений до выхода на реальные объекты. Апробация предлагаемой методики выполнена на полномасштабном аналитическом тренажере атомного блока с реактором ВВЭР-1000, являющегося программным продуктом ООО «Вестерн Сервисес» [15], реализованном на персональном компьютере в программной среде 3KeyMaster и являющегося компьютерной моделью функционирования энергоблока в различных режимах в реальном времени.

При симуляции экспериментов на тренажере при отключенном автоматическом регуляторе мощности возмущение реактора проводилось регулирующей группой на фиксируемую глубину со штатной скоростью 2 см/с. Предварительно за счет борной перекомпенсации регулирующая группа выводилась на верхний конечный выключатель. В дальнейшем концентрация борной кислоты оставалась неизменной, отравление реактора ксеноном за время проведения численных экспериментов не изменялось, и для «чистоты» эксперимента рассматривалась модель неотравленного реактора. В соотношения (8) и (9) были добавлены слагаемые, учитывающие положительный барометрический эффект реактивности. В ходе переходного процесса измерялись интересующие нас временные зависимости: положение регулирующей группы нейтронная мощность, реактивность реактора, температуры теплоносителя и давление теплоносителя в первом контуре. Так как зависимость температуры топлива от времени непосредственно на эксперименте не определяется, то её можно найти из уравнения теплового баланса (4), решение которого выражается в квадратурах:

$$T_u(t) = T_u(0) e^{-\frac{t}{\tau_u}} + \frac{e^{-\frac{t}{\tau_u}}}{m_u c_u} \int_0^t N(t') e^{\frac{t'}{\tau_u}} dt' + \frac{e^{-\frac{t}{\tau_u}}}{\tau_u} \int_0^t T_B(t') e^{\frac{t'}{\tau_u}} dt'. \quad (13)$$

где  $\tau_u = \frac{m_u C_u}{kF} = 3,6 \div 4,2 \text{ с}$  – характерное время теплопередачи от топлива к теплоносителю.

В остальном методика обработки результатов экспериментов оставалась в соответствии с вышеизложенным.

Таким образом, оптимизационный метод решения обратной задачи позволил за одну серию экспериментов определить коэффициенты реактивности и введенную реактивность, что позволяет для поэтапного возмущения реактора погружением твердых поглотителей построить их интегральную и дифференциальную характеристики.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД ЭО 0151-2004. Методики расчета нейтронно-физических характеристик по данным физических экспериментов на энергоблоках атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000 [Текст]. – Москва : Росэнергоатом, 2005. – 101 с.
2. РД ЭО 0150-2004. Типовые программы и методики проведения физических экспериментов на энергоблоках атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000 [Текст]. – Москва : Росэнергоатом, 2005. – 273 с.
3. *Вольман, М.А.* Имитационное моделирование нейтронно-физических и теплогидравлических процессов в реакторах ВВЭР-1000: автореф. дис. канд. техн. наук [Текст] / М.А. Вольман. – Москва, 2017. – 20 с.
4. *Семенов, В.К.* Методика определения коэффициентов реактивности и эффективности групп твердых поглотителей на аналитическом тренажере энергоблока ВВЭР-1000 [Текст] / В.К. Семенов, М.А. Вольман, А.А. Беляков // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2018. – № 1. – С. 19-24.
5. *Казанский, Ю.А.* Кинетика ядерных реакторов. Коэффициенты реактивности. Введение в динамику: учебное пособие [Текст] / Ю.А. Казанский, Я.В. Слекеничс – Москва : МИФИ, 2012. – 300 с.
6. *Кошелев, А.С.* О возможности создания специализированного ОРУК-реактиметра с токовым детектором нейтронов [Текст] / А.С. Кошелев, А.В. Арапов, М.А. Овчинников // Вопросы атомной науки и техники. Серия : Физика ядерных реакторов. – 2015. – № 4. – С. 39-48.
7. *Колесов, В.Ф.* Истоки неточностей в реактивности, определяемой с помощью обращенного решения уравнений кинетики [Текст] // Вопросы атомной науки и техники. Серия : Физика ядерных реакторов. – 2013. – № 3. – С. 30-45.
8. *Зизин, М.Н.* О трактовке обращенного уравнения кинетики и пространственно-временных расчётов эффективности аварийной защиты ВВЭР-1000 [Текст] / М.Н. Зизин, Л.Д. Иванов // Вопросы атомной науки и техники. Серия : Физика ядерных реакторов. – 2012. – № 2. – С. 28-43.
9. *Семенов, В.К.* Обоснование математической модели теплообмена для реактора с сосредоточенными параметрами [Текст] / В.К. Семенов, М.А. Вольман // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – № 4 (17). – С. 35-42.
10. *Дугинов, О.Б.* SSL DYNCO LAB SYSTEM – Готовые решения в области обучающих тренажерных систем [Текст] / О.Б. Дугинов, А.В. Левченко, Д.С. Самохин // XIII Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров». – Обнинск : ИАТЭ, 2013 – С. 195-198.
11. *Чернов, Е.В.* Применение компьютерных тренажеров в подготовке специалистов для ядерной энергетики [Текст] / Е.В. Чернов, С.Б. Выговский, Д.И. Макаун, В.Е. Ямный // Энергетическая Стратегия. – 2010. – № 5 (17). – С. 58-60.
12. *Лощаков, И.И.* Компьютерный тренажер «АЭС с РБМК-1000» [Текст] / И.И. Лощаков, К.М. Мазурик, Г.А. Ромахова, Г.П. Шаргин // Безопасность АЭС и подготовка кадров. X Международная конференция : Тезисы докладов (Обнинск, 1-4 октября 2007 г.). Часть 1. – Обнинск: ИАТЭ, 2007. – С. 57-58.
13. *Росляков, М.В.* Опыт внедрения тренажера оперативного моделирования аварийных ситуаций «ТОМАС-1А» в учебно-методический процесс кафедры «Атомная энергетика» УГТУ-УПИ [Текст] / М.В. Росляков, Г.П. Титов, С.Е. Щеклеин, А.И. Айзатулин, Е.Ф. Селезнев, И.П. Федоров // Перспективные энергетические технологии. Экология. Экономика, безопасность и подготовка кадров. Сбор. науч. трудов. – Екатеринбург, 2006. – С. 150.
14. *Чернаков, В.А.* Особенности современных моделирующих комплексов сложных технологических объектов (на примере анализатора режимов АЭС с ВВЭР) [Текст] / В.А. Чернаков, М.А. Осадчий // Приборы. – № 7. – 2002. – С. 12.
15. Western Services Corporation [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ws-corp.com>.

## REFERENCES

- [1] RD EO 0151-2004. Metodiki rascheta neytronno-fizicheskikh kharakteristik po dannym fizicheskikh eksperimentov na energoblokakh atomnykh elektrostantsiy s reaktorami VVER-1000 [Calculation Methods of Neutron-Physical Characteristics According to Physical Experiments on Nuclear Power Units with WWER-1000]. Moscow: Rosenergoatom. 2005. 101 p. (in Russian).
- [2] RD EO 0150-2004. Tipovye programmy i metodiki provedeniya fizicheskikh eksperimentov na energoblokakh atomnykh elektrostantsiy s reaktorami VVER-1000 [Typical Programs and Methods of Physical Experiments on Nuclear Power Units with WWER-1000]. Moscow: Rosenergoatom. 2005. 273 p. (in Russian).
- [3] Volman M.A. Imitacionnoe modelirovanie neytronno-fizicheskikh i teplogidravlicheskh processov v reaktorah VVER-1000 [Simulation Modeling of Neutron-Physical and Thermal-Hydraulic Processes in WWER-1000 Reactors. Thesis Abstract of Ph. D. in Engineering]. Moscow. 2017. 20 p. (in Russian).
- [4] Semenov V.K., Volman M.A., Belyakov A.A. Metodika opredeleniya koeffitsientov reaktivnosti i effektivnosti grupp tverdykh poglotiteley na analiticheskom trenazhere energobloka VVER-1000 [Method for Determination Of Reactivity Coefficients and Efficiency of Solid Absorbers on Computer Simulator WWER-1000]. Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta [Bulletin of Ivanovo State Power University]. 2018. issue 1. P. 19-24 (in Russian).
- [5] Kazanskij Yu.A., Slemenichs Ya.V. Kinetika yadernykh reaktorov. Koeffitsienty reaktivnosti. Vvedenie v dinamiku: Uchebnoe posobie [The Coefficients of Reactivity. Introduction to Dynamics: Training Course]. Moscow: National Research Nuclear University MEPhI. 2012. 300 p. (in Russian).
- [6] Koshelev A.S., Arapov A.V., Ovchinnikov M.A. O vozmozhnosti sozdaniya spetsializirovannogo oruk-reaktimetrov s tokovym detektorom neytronov [Possibility of Creation of a Specialized ORUK-Reactimeter with a Current Detector of Neutrons]. Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov [Questions of Atomic Science and Technology. Series: Physics of Nuclear Reactors]. 2015. issue 4. P. 39-48 (in Russian).
- [7] Kolesov V.F. Istoki netochnostey v reaktivnosti, opredelyaemoy s pomoshch'yu obrashchennogo resheniya uravneniy kinetiki [Background of Uncertainties in Reactivity Determined with the Aid of Inverse Solution of Kinetics Equations]. Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov [Questions of Atomic Science and Technology. Series: Physics of Nuclear Reactors]. 2013. issue 3. P. 30-45 (in Russian).
- [8] Zizin M.N., Ivanov L.D. O traktovke obrashchennogo uravneniya kinetiki i prostranstvenno-vremennykh raschetov effektivnosti avariynoy zashchity VVER-1000 [About Interpretation of the Inverted Equation of Kinetics and Space-Time Calculations of the VVER-1000 Reactor Scram System Effectiveness]. Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov [Questions of Atomic Science and Technology. Series: Physics of Nuclear Reactors]. 2012. issue 2. P. 28-43 (in Russian).
- [9] Semenov V.K., Volman M.A. Obosnovanie matematicheskoy modeli teploobmena dlya reaktora s sosredotochennymi parametrami [Argumentation of Heat-Exchange Mathematical Model for Reactor with Lumped Parameters]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2015. issue 4 (17). P. 35-42 (in Russian).
- [10] Duginov O.B., Levchenko A.V., Samokhin D.S. SSL DYNCO LAB SYSTEM – Gotovye resheniya v oblasti obuchayushchikh trenazhernykh system [SSL DYNCO LAB SYSTEM - Ready-Made Solutions in the Field of Training Simulator Systems]. XIII Mezhdunarodnaya konferentsiya «Bezopasnost' AES i podgotovka kadrov» [XIII International Conference "NPP Safety and Training"]. Obninsk: IATE. 2013. P. 195-198 (in Russian).
- [11] Chernov E.V., Vygovskiy S.B., Makaun D.I., Yamnyy V.E. Primenenie komp'yuternykh trenazherov v podgotovke spetsialistov dlya yadernoy energetiki [The Use of Computer Simulators in Training Specialists for Nuclear Power]. Energeticheskaya Strategiya (Energy Strategy). 2010. issue 5 (17). P.58-60 (in Russian).
- [12] Loshchakov I.I., Mazurik K.M., Romakhova G.A., Shargin G.P. Komp'yuternyy trenazher «AES s RBMK-1000» [Computer Simulator "NPP with RBMK-1000"]. X Mezhdunarodnaya konferentsiya «Bezopasnost' AES i podgotovka kadrov» [Safety of Nuclear Power Plants and Training of Personnel. X International Conference: Abstracts]. Obninsk: IATE. 2007. P. 57-58 (in Russian).
- [13] Roslyakov M.V., Titov G.P., Shcheklein S.E., Ayzatulin A.I., Seleznev E.F., Fedorov I.P. Opyt vnedreniya trenazhera operativnogo modelirovaniya avariynykh situatsiy «TOMAS-1A» v uchebno-metodicheskiy protsess kafedry «Atomnaya energetika» UGTU-UPI [Experience in Implementing the Simulator of Operational Modeling of Emergency Situations "TOMAS-1A" in the Educational-Methodical Process]. Perspektivnye energeticheskie tekhnologii. Ekologiya. Ekonomika, bezopasnost' i podgotovka kadrov ["Perspective Energy Technologies. Ecology. Economics, Security and Training". Collection of scientific papers]. Ekaterinburg. 2006. P. 150 (in Russian).
- [14] Chernakov V.A., Osadchiy M.A. Osobennosti sovremennykh modeliruyushchikh kompleksov slozhnykh tekhnologicheskikh ob"ektov (na primere analizatora rezhimov AES s VVER) [Features of



Modern Modeling Complexes of Complex Technological Objects]. Pribory [Devices]. 2002. issue 7. P. 12 (in Russian).

[15] Western Services Corporation. Available at: <http://www.ws-corp.com>.

## **Estimation of the Accuracy of the Method of Reactivity Coefficient Identification and Solid Absorbers Efficiency Based on Reverse Problem Solution of Point Reactor Dynamics**

**V.K. Semenov<sup>1</sup>, M.A. Volman<sup>2</sup>**

*Ivanovo State Power Engineering University, 34, Rabfakovskaya st., Ivanovo, Russia 153003*

<sup>1</sup>*ORCID iD: 0000-0001-9765-2096*

*WoS Researcher ID: T-1066-2017*

*e-mail: [Semenov\\_vk@mail.ru](mailto:Semenov_vk@mail.ru)*

<sup>2</sup>*ORCID iD: 0000-0001-6805-6287*

*WoS Researcher ID: M-1304-201*

*e-mail: [m\\_volman@mail.ru](mailto:m_volman@mail.ru)*

**Abstract** – The estimation of the method of the reactivity coefficient determining and the absorbers efficiency is evaluated. The results of solving the direct and reverse task of the dynamics of a point reactor are compared. The technique is tested on a full-scale computer simulator of a power unit with a WWER-1000 reactor. It is shown that the optimization method for solving the inverse problem of reactor dynamics has good accuracy.

*Keywords:* effects and coefficients reactivity, reversed solutions, reactor dynamics, numerical experiments, point reactor, optimization method.