

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА РЕАКТИВНОСТИ РЕАКТОРА ВВР-ц В РАБОЧЕМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР

**О.Ю. Кочнов, Д.А. Пахолик, Е.В. Никулин, В.В. Колесов**

*АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова»*

*249033, Россия, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 6*



Температурный коэффициент реактивности, проявляющийся при изменении температуры замедлителя (теплоносителя), является одним из самых важных нейтронно-физических параметров реактора. В первую очередь, он применяется при расчете запаса реактивности на кампанию и во время регулирования работы реактора. Ранее для реактора ВВР-ц температурный коэффициент реактивности был определен во время экспериментального исследования на минимально контролируемом уровне мощности при относительно низких температурах замедлителя, не соответствующих номинальным значениям, что влияет на точность расчетной оценки запаса реактивности реактора.

Работа посвящена исследованию температурного коэффициента реактивности реактора ВВР-ц, проявляющегося при изменении температуры замедлителя реактора в рабочем диапазоне температур. Представлены методика и описание эксперимента по определению температурного коэффициента реактивности, результаты расчетного исследования с помощью программы MCNP. Полученные значения температурного коэффициента реактивности необходимы для уточнения модели активной зоны реактора ВВР-ц при проведении нейтронно-физических расчетов и для подтверждения безопасной эксплуатации реактора.

**Ключевые слова:** реактор ВВР-ц, температурный эффект реактивности, температурный коэффициент реактивности, оперативный запас реактивности.

*Кочнов О.Ю., Пахолик Д.А., Никулин Е.В., Колесов В.В.* Определение температурного коэффициента реактивности реактора ВВР-ц в рабочем диапазоне температур. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2022. – № 4. – С. 19-27. DOI: <https://doi.org/10.26583/pre.2022.4.02> .

### ВВЕДЕНИЕ

Во время эксплуатации водо-водяных исследовательских ядерных реакторов для удобства работы оперативного персонала выделяют два основных эффекта воздействия на реактивность. Первый эффект наблюдается при изменении температуры замедлителя (теплоносителя) и проявляется относительно медленно. Он связан с характеристиками замедлителя и называется температурным эффектом [1, 2]. Вторым, быстро проявляющийся эффект, наблюдается при изменении мощности реактора. Он существенно меньше температурного эффекта, связанного с изменением температуры замедлителя,

© *О.Ю. Кочнов, Д.А. Пахолик, Е.В. Никулин, В.В. Колесов, 2022*

и является следствием изменения температуры топлива. Данный эффект называют мощностным эффектом реактивности [1, 2].

Мощностной эффект реактивности реактора ВВР-ц (АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова», г. Обнинск) был изучен в эксперименте, представленном в [3]. Согласно [3], мощностной коэффициент реактивности ВВР-ц непостоянен в диапазоне мощности 1 – 10 МВт и изменяется в интервале от  $-0,0035 \pm 0,0004$  до  $-0,0013 \pm 0,0002\%/МВт$ .

Температурный коэффициент реактивности реактора ВВР-ц, связанный с замедлителем, был определен в эксперименте, представленном в работе [4]. Согласно [4], его значение составило  $-0,0087 \pm 0,0002\%/^{\circ}C$ . Данная величина температурного коэффициента реактивности была получена при экспериментальном исследовании на минимальном контролируемом уровне мощности реактора. Температура замедлителя во время эксперимента изменялась от 10 до 18 $^{\circ}C$ . Данный диапазон температуры значительно отличается от номинальных значений, что потребовало проведения дополнительных исследований. Методика экспериментальной оценки температурного коэффициента реактивности в рабочем диапазоне температур изложена далее.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследовательского ядерного реактора ВВР-ц [5 – 8] реактивность, вносимую за счет температурного эффекта, можно оценить по изменению запаса реактивности. Запас реактивности реактора рассчитывается исходя из глубины погружения компенсирующих стержней в активную зону. При расчете применяются интегральные градуировочные характеристики стержней СУЗ ВВР-ц (рис. 1).

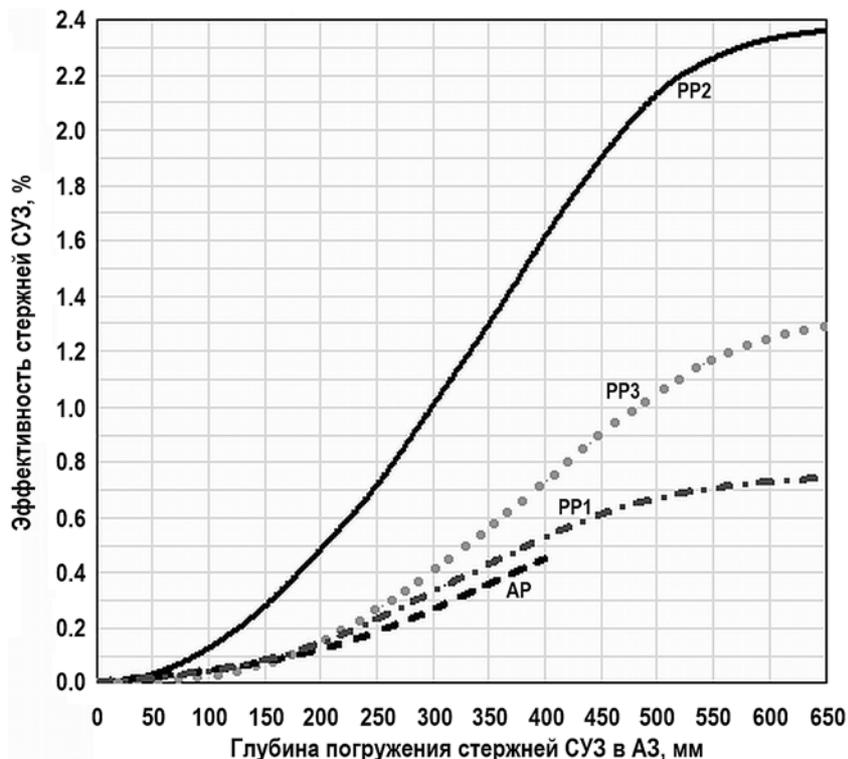


Рис. 1. Интегральные характеристики стержней СУЗ ВВР-ц: PP1 – компенсирующие стержни ручного регулирования № 1; PP2 – компенсирующие стержни ручного регулирования № 2; PP3 – компенсирующий стержень ручного регулирования № 3; AP – стержень автоматического регулятора уровня мощности

Таким образом, вносимую реактивность при изменении температуры замедлителя

можно оценить за счет разности высотных положений компенсирующих стержней СУЗ, используя зависимость их эффективности от глубины погружения. Экспериментальное определение интегральных характеристик рабочих органов СУЗ реактора ВВР-ц выполняется ежегодно после окончания планово-предупредительного ремонта.

Экспериментальные исследования с целью определения значения температурного коэффициента реактивности  $\partial\rho/\partial t$  проводятся при работе реактора на стационарном уровне мощности и равновесном отравлении реактора  $^{135}\text{Xe}$  (время работы реактора на стационарном уровне мощности более сорока часов). Это необходимо для минимизации погрешности определения  $\partial\rho/\partial t$  за счет изменения запаса реактивности при нестационарных процессах в реакторе. Расход замедлителя через активную зону и давление в первом контуре не изменяются в течение всей кампании. Автоматический регулятор мощности (АРМ) находится в рабочем режиме и поддерживает нейтронную мощность реактора за счет перемещения стержня автоматического регулирования (АР). Фиксируются положения стержней СУЗ. Затем изменяется температура замедлителя реактора на величину  $\Delta t$  с помощью изменения режима охлаждения второго контура за счёт работы градирни. Фиксируются положения стержней СУЗ при новой температуре.

#### Алгоритм действий

1. Вывести реактор на уровень мощности 10 МВт. В этом случае не нарушается технологический процесс.

2. Дождаться стационарного отравления реактора. Время работы реактора на стационарном уровне мощности до проведения эксперимента должно быть более 40 часов. Расход замедлителя через активную зону и давление в первом контуре не изменяются. Зафиксировать величины

$\rho_{зан 1}$  – значение запаса реактивности реактора в начале эксперимента;

$t_{1к 1}$  – значение средней температуры замедлителя в начале эксперимента;

$\tau_1$  – начальное время эксперимента.

3. Не изменяя мощности реактора и гидравлических параметров первого контура, увеличить температуру замедлителя за счёт работы градирни.

4. Выполнить измерение температурного эффекта реактивности (при каждом изменении температуры на  $\Delta t = 1^\circ\text{C}$  зафиксировать значения запаса реактивности и средней температуры замедлителя с фиксацией времени).

#### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В соответствии с еженедельным планом работ реактор был выведен на уровень мощности 10 МВт. В течение кампании мощность реактора не изменялась. Равновесное отравление было достигнуто через 40 часов работы реактора. Измерение температурного эффекта реактивности было выполнено через 100 часов работы реактора на стационарном уровне мощности.

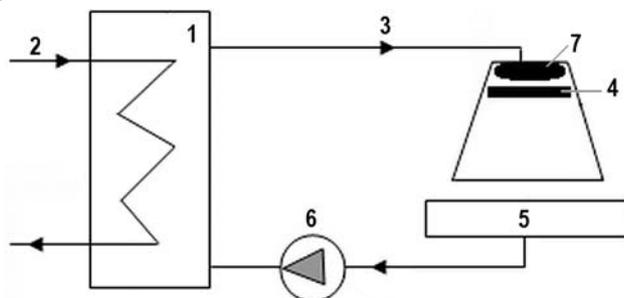


Рис. 2. Упрощенная схема второго контура: 1 – теплообменник; 2 – трубопроводы первого контура; 3 – трубопроводы второго контура; 4 – оросители градирни; 5 – чаша градирни; 6 – насосы второго контура; 7 – вентиляторы градирни

Температурное возмущение вносилось за счет работы второго контура.

Рассмотрим упрощенную схему второго контура реактора ВВР-ц (рис. 2). Подогрев воды второго контура осуществляется в теплообменниках. Далее нагретая вода поступает в градирню, где за счет работы оросителей и вентиляторов охлаждается окружающей средой. Охлажденная вода сливается в чашу градирни и далее насосами подается в теплообменник. Регулирование режима охлаждения воды второго контура выполнялось за счет включения (отключения) вентиляторов и оросителей градирни.

Полный диапазон изменения средней температуры замедлителя для оценки температурного коэффициента реактивности (ТКР) составил 43 – 53°C. Данный диапазон температур является характерным для эксплуатационных режимов реактора ВВР-ц. Фиксация значения запаса реактивности производилась при изменении средней температуры замедлителя на величину  $\Delta t = 1^\circ\text{C}$ . Шаг в  $1^\circ\text{C}$  выбран исходя из удобства измерения, обработки результатов и их представления (в данном интервале теоретически не может наблюдаться резких изменений величины ТКР, но легко наблюдается тенденция изменения искомой величины). В целях уменьшения погрешности эксперимента компенсация вносимой реактивности выполнялась в автоматическом режиме поддержания нейтронной мощности реактора и только стержнем АР.

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫВОДЫ

Определение температурного коэффициента реактивности основывается на регистрации изменения запаса реактивности, обусловленного изменением средней температуры замедлителя и выгоранием топлива. При этом другие параметры, такие как расход замедлителя через активную зону, давление в первом контуре и нейтронная мощность реактора остаются неизменными. Изменение запаса реактивности в этом случае можно представить в следующем виде:

$$\Delta\rho = \frac{\partial\rho}{\partial t} \Delta t + \Delta\rho_{\text{выг}}, \quad (1)$$

где  $\partial\rho/\partial t$  – температурный коэффициент реактивности;  $\Delta\rho_{\text{выг}}$  – изменение запаса реактивности во времени за счет выгорания топлива;  $\Delta t$  – изменение средней температуры замедлителя.

Температурный коэффициент реактивности в данном случае рассчитывается по формуле

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} = \frac{\Delta\rho - \Delta\rho_{\text{выг}}}{\Delta t}. \quad (2)$$

Изменение запаса реактивности  $\Delta\rho$ , полученное в эксперименте, представлено на рис. 3.

Изменение запаса реактивности во времени за счет выгорания топлива зависит от времени работы и мощности реактора:

$$\Delta\rho_{\text{выг}} = -\mu(\tau_{\text{раб}}, N) \cdot \tau_{\text{раб}} \cdot N, \quad (3)$$

где  $\Delta\rho_{\text{выг}}$  – потеря реактивности за счет выгорания;  $N$  – мощность реактора;  $\tau_{\text{раб}}$  – время работы реактора;  $\mu(\tau_{\text{раб}}, N)$  – средний коэффициент выгорания топлива в активной зоне.

Для реактора ВВР-ц средний коэффициент выгорания топлива в активной зоне экспериментально получен в работе [4]. Его значение  $\mu = -9,9 \cdot 10^{-3}\% / (\text{МВт} \cdot \text{сут})$ . Время работы реактора  $\tau_{\text{раб}}$  в данном случае – это время выполнения одного шага.

Полученные в эксперименте значения величины изменения запаса реактивности и расчетные значения величины  $\Delta\rho_{\text{выг}}$  представлены в табл. 1. Стартовое значение средней температуры замедлителя  $43^\circ\text{C}$ . Каждому шагу соответствует изменение сред-

ней температуры замедлителя  $\Delta t = 1^\circ\text{C}$ .

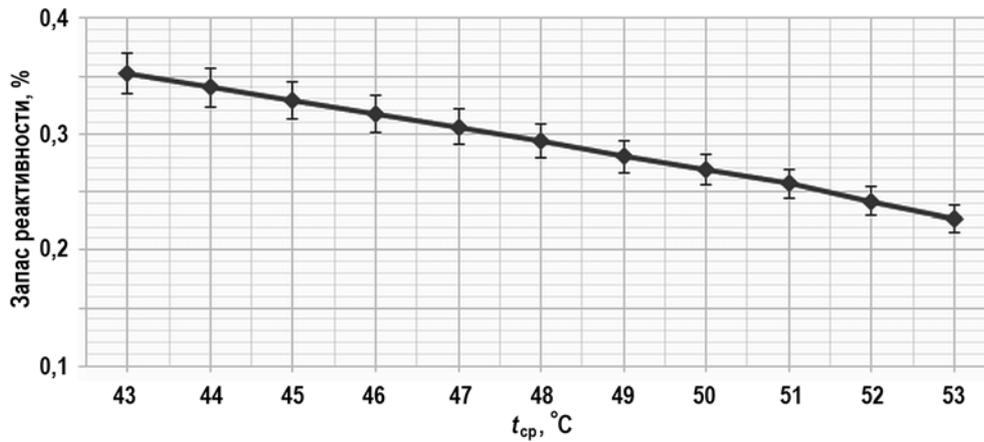


Рис. 3. Изменение запаса реактивности при изменении средней температуры замедлителя

Таблица 1

**Результаты экспериментального исследования**

Шаг	Время шага, с	$\Delta\rho$ , %	$\Delta\rho_{\text{ввж}}$ , %
1	451	-0,0119	-0,0005
2	436	-0,0113	-0,0005
3	382	-0,0104	-0,0004
4	376	-0,0113	-0,0004
5	388	-0,0121	-0,0004
6	430	-0,0130	-0,0005
7	456	-0,0116	-0,0005
8	488	-0,0133	-0,0006
9	512	-0,0148	-0,0006
10	523	-0,0153	-0,0006

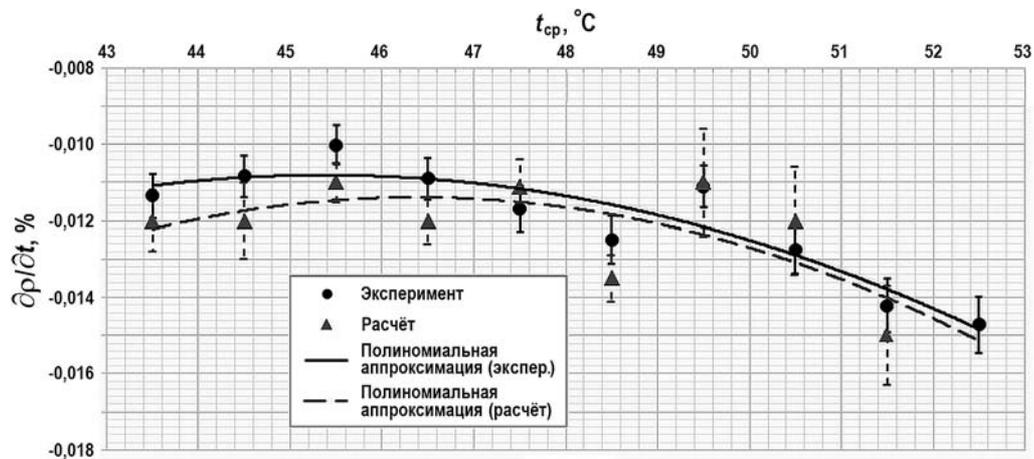


Рис. 4. Температурный коэффициент реактивности реактора ВВР-ц в рабочем диапазоне температур

Результаты расчета температурного коэффициента реактивности по данным экспериментального исследования представлены на рис. 4. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что температурный коэффициент реактивности имеет непостоянное значение в рабочем диапазоне температур. Его значение варьируется от  $-0,0147 \pm 0,0007$  до  $-0,0100 \pm 0,0005\%/^{\circ}\text{C}$ .

Среднее значение температурного коэффициента реактивности в диапазоне температур 43 – 53 $^{\circ}\text{C}$  составило  $-0,0120 \pm 0,0006\%/^{\circ}\text{C}$ . Поскольку температура топлива в твэлах реактора ВВР-ц не превосходит 100 $^{\circ}\text{C}$ , Доплер-эффект в топливе, возникающий при небольшом изменении температуры замедлителя при проведении измерений, не учитывался. Измеренный температурный коэффициент реактивности отличается от ранее оцененного в работе [4] вследствие использования другой методики эксперимента и эксплуатационного интервала температуры замедлителя.

Были также получены расчетные значения запаса реактивности и температурного коэффициента реактивности в том же интервале температур. Расчеты проводились с использованием модели реактора ВВР-ц, приведенной в работе [9], и программы MCNP [10] с библиотекой констант JENDL-3.2 [11]. В расчетах использовались средние по зоне температуры топлива и замедлителя. Повышение температуры замедлителя рассматривалось одинаковое по всей активной зоне. Рассчитанный температурный коэффициент реактивности сравнивается с экспериментальным (см. рис. 4). Как видно из рисунка, экспериментальные и расчетные значения запаса реактивности совпадают в пределах приведенных статистических и экспериментальных погрешностей во всех точках.

Следует отметить, что полученный температурный коэффициент реактивности имеет отрицательное значение на всем рабочем диапазоне температур, что соответствует требованиям [12]. Таким образом, подтверждается обеспечение безопасной эксплуатации реактора ВВР-ц.

Полученные значения температурного коэффициента реактивности необходимы для уточнения модели активной зоны реактора ВВР-ц при проведении нейтронно-физических расчетов и будут использоваться в расчетах кампании реактора.

### **Литература**

1. Дементьев Б.А. Кинетика и регулирование ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.
2. Бушуев А.В. Экспериментальная реакторная физика. Учебное пособие. – М.: МИФИ, 2008. – 280 с.
3. Колесов В.В., Самохин Д.С., Кочнов О.Ю. Измерение мощностного коэффициента реактивности ВВР-Ц в широком диапазоне мощности. // Атомная энергия. – 2017. – Т. 122. – Вып. 4 – С. 190-192. Электронный ресурс <http://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/673> (дата доступа 12.08.2022).
4. Кочнов О.Ю. Комплекс информационной поддержки оператора ВВР-ц. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Обнинск: ИАТЭ, 2006. – 130 с.
5. Чусов И.А., Шелегов А.С., Кочнов О.Ю. Особенности конструкций исследовательских реакторов водо-водяного типа. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – № 3. – С. 116-126. DOI: <https://doi.org/10.26583/pre.2016.3.12>.
6. Григорьев Е.И., Киреев А.Ф., Мелехин Ю.А., Ярына В.П. Контролируемые нейтронные поля на реакторе ВВР-Ц для задач ядерной технологии. // Атомная энергия. – 1990. – Т. 68 – Вып. 2. – С. 131-133. Электронный ресурс: [http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya\\_t68-2\\_1990/go,58/](http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t68-2_1990/go,58/) (дата доступа 12.08.2022).
7. Колесов В.В., Кочнов О.Ю., Фомин Р.В. Улучшение нейтронно-физических характеристик ВВР-ц посредством замены части ТВС активной зоны на бериллиевый отражатель. // Атомная энергия. – 2015. – Т. 118. – № 4. – С. 191-193. Электронный ресурс: <http://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/833> (дата доступа 12.08.2022).

8. *Кочнов О.Ю., Колесов В.В., Фомин Р.В., Фомиченко П.А.* Возможность увеличения числа экспериментальных каналов ВВР-ц за счет изменения конструкции активной зоны. // Атомная энергия. – 2018. – Т. 125. – № 3. – С. 146-146. Электронный ресурс: <http://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2217> (дата доступа 12.08.2022).

9. *Колесов В.В., Волков Ю.В., Украинцев В.Ф., Фомин Р.В.* Создание прецизионной модели реактора ВВР-ц для последующей оптимизации его конструкции и наработки <sup>99</sup>Mo и других радионуклидов. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – №4. – С. 129-133. Электронный ресурс: <https://nuclear-power-engineering.ru/article/2011/4/17/> (дата доступа 12.08.2022).

10. *Judith F. Briesmeister, Ed.* «MCNP4B - A General Monte Carlo N - Particle Transport code». Los Alamos National Laboratory report LA-12625-M. Manual. 1997.

11. *Nakagawa Ts., Shibata K., Chiba S., Fukahori T., Nakajima Yu., Kikuchi Ya., Kawano T., Kanda Yu., Ohsawa T., Matsunobu H., Kawai M., Zukeran A., Watanabe T., Igarasi S., Kosako K. & Asami T.* Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision 2: JENDL-3.2 *Journal of Nuclear Science and Technology*. 1995, v. 32, iss.12, pp. 1259-1271; DOI: <https://doi.org/10.1080/18811248.1995.9731849>.

12. НП-009-17. Правила ядерной безопасности исследовательских реакторов. – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2017. – 44 с. Электронный ресурс: <https://base.garant.ru/71756202/> (дата доступа 12.08.2022).

Поступила в редакцию 15.08.2022 г.

#### Авторы

Кочнов Олег Юрьевич, главный инженер, доктор техн. наук

E-mail: [kochnov2000@mail.ru](mailto:kochnov2000@mail.ru)

Пахолик Денис Анатольевич, ведущий инженер-физик, аспирант

E-mail: [pakholikda@mail.ru](mailto:pakholikda@mail.ru)

Никулин Евгений Валерьевич, инженер-физик 2 категории

E-mail: [nikulin@karpovipc.ru](mailto:nikulin@karpovipc.ru)

Колесов Валерий Васильевич, инженер 1 категории, канд. физ.-мат. наук

E-mail: [kolesov@iate.obninsk.ru](mailto:kolesov@iate.obninsk.ru)

UDC 621.039.516.25

## **DETERMINING THE TEMPERATURE COEFFICIENT OF REACTIVITY OF THE VVR-ts REACTOR IN THE OPERATING TEMPERATURE RANGE**

Kochnov O.Yu., Pakholik D.A., Nikulin E.V., Kolesov V.V.

Karpov Research and Development Institute for Physical Chemistry JSC

6 Kievskoye Shosse, 249033 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

#### ABSTRACT

The VVR-ts research nuclear reactor is designed to perform a wide range of scientific and experimental work, such as: research in the field of radiation chemistry and solid state physics, radiation processing of materials, research in the field of radiation materials science, neutron activation and neutron structural analysis, biomedical research, etc.

The temperature coefficient of reactivity, which manifests itself when the moderator (coolant) temperature changes, is one of the most important reactor neutronic parameters. First of all, it is used in the calculation of the reactor reactivity margin.

Previously, for the VVR-ts reactor, the temperature coefficient of reactivity was determined in the course of experimental studies at the minimum controlled power level at relatively low moderator temperatures that do not correspond to the nominal values. This, in turn, affects the accuracy of the calculated estimate of the reactor reactivity margin.

The purpose of this work is to study the temperature coefficient of reactivity of the VVR-ts reactor, which manifests itself when the temperature of its moderator changes in the operating temperature range. The paper presents the methodology and description of the experiment to determine the temperature coefficient of reactivity as well as the results of a computational study using the MCNP program. The obtained values of the temperature coefficient of reactivity are necessary for refining the model of the VVR-ts reactor core during neutronic calculations and confirming the safe operation of the reactor.

**Key words:** VVR-ts reactor, temperature effect of reactivity, temperature coefficient of reactivity, operational reactivity margin.

Kochnov O.Yu., Pakholik D.A., Nikulin E.V., Kolesov V.V. Determining the Temperature Coefficient of Reactivity of the VVR-ts Reactor in the Operating Temperature Range. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2022, no. 4, pp. 19-27; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2022.4.02> (in Russian).

#### REFERENCES

1. Dementiev B.A. *Kinetics and Regulation of Nuclear Reactors*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1986, 272 p. (in Russian).
2. Bushuev A.V. *Experimental Reactor Physics. Tutorial*. Moscow. MEFI Publ., 2008, 280 p. (in Russian).
3. Kolesov V.V., Samokhin D.S., Kochnov O.Yu. Measurement of the Power Coefficient of Reactivity of VVR-ts in a Wide Power Range. *Atomic Energy*. 2017, v. 122, pp. 226-229; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-017-0260-x>.
4. Kochnov O.Yu. *The Complex of Information Support of the Operator VVR-ts*. Cand. Sci. (Engineering) Diss. Obninsk. INPE Publ., 2006, 130 p. (in Russian).
5. Chusov I.A., Shelegov A.S., Kochnov O.Yu. Features of the Design of Research Reactors of Pressurized Water Type. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2016, no. 3, pp. 116-126; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2016.3.12> (in Russian).
6. Grigoriev E.I., Kireev A.F., Melekhin Yu.A., Yaryna V.P. Monitored Neutron Fields in the VVR-ts Reactor for Nuclear Technology Tasks. *Atomic Energy*. 1990, v. 68, pp. 158-161; DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02069878>.
7. Kolesov V.V., Kochnov O.Yu., Fomin R.V. Improvement of Neutron-Physical Characteristics of VVR-ts by Means of Replacement of a Part of Core Fuel Assembly by a Beryllium Reflector. *Atomnaya Energiya*. 2015, v. 118, no. 4, pp. 191-193. Available at: <http://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/833> (accessed Aug. 12, 2022) (in Russian).
8. Kochnov O.Yu., Kolesov V.V., Fomin R.V., Fomichenko P.A. Possibility of Increasing the Number of Experimental Channels in VVR-ts by Changing The Core Design. *Atomic Energy*. 2018, v. 125, pp. 162-164; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-018-00460-7>.
9. Kolesov V.V., Volkov Yu.V., Ukraintsev V.F., Fomin R.V. Creation of a Precision Model of the VVR-ts Reactor for Subsequent Optimization of its Design and Development of  $^{99}\text{Mo}$  and Other Radionuclides. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2011, no. 4, pp. 129-133. Available at: <https://nuclear-power-engineering.ru/article/2011/4/17/> (accessed Aug. 12, 2022) (in Russian).
10. Judith F. Briesmeister, Ed. *MCNP4B – A General Monte Carlo N-Particle Transport code*. Los Alamos National Laboratory Report LA-12625-M. Manual. 1997.
11. Nakagawa Ts., Shibata K., Chiba S., Fukahori T., Nakajima Yu., Kikuchi Ya., Kawano T.,

Kanda Yu., Ohsawa T., Matsunobu H., Kawai M., Zukeran A., Watanabe T., Igarasi S., Kosako K. & Asami T. Japanese Evaluated Nuclear Data Library Ver. 3 Rev. 2: JENDL-3.2 *Journal of Nuclear Science and Technology*. 1995, v. 32, iss.12, pp. 1259-1271; DOI: <https://doi.org/10.1080/18811248.1995.9731849> .

12. NP-009-17. *Rules of Nuclear Safety of Research Reactors*. Moscow. FBU NTC NRS Publ., 2017, 44 p. Available at: <https://base.garant.ru/71756202/> (accessed Aug. 12, 2022) (in Russian).

#### **Authors**

Kochnov Oleg Yurievich, Chief Engineer, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: [kochnov2000@mail.ru](mailto:kochnov2000@mail.ru)

Pakholik Denis Anatolievich, Leading Physics Engineer, PhD Student

E-mail: [pakholikda@mail.ru](mailto:pakholikda@mail.ru)

Nikulin Evgeny Valerievich, 2nd Category Physics Engineer

E-mail: [nikulin@karpovipc.ru](mailto:nikulin@karpovipc.ru)

Kolesov Valery Vasilievich, 1st category Engineer, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: [kolesov@iate.obninsk.ru](mailto:kolesov@iate.obninsk.ru)