

УДК 621.039.5

Математическое моделирование и стратегия использования остаточного ресурса расходомеров остановленных энергоблоков РБМК в процессе вывода АЭС из эксплуатации

© 2025 г. А. М. Загребаев¹, Е. В. Евстюхина¹, А. С. Ястребов¹, М. Г. Андреев²

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

² Курская АЭС – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», Курская область, г. Курчатова, 307250, Россия

В процессе вывода из эксплуатации ядерных энергоблоков с реакторами РБМК в остановленных энергоблоках (помимо энергоресурса невыгоревшего топлива) остается невыработанный рабочий ресурс (ресурс по наработке) приборов, элементов оборудования и др. При определенных условиях этот ресурс может быть использован в работающих энергоблоках. Примером этому является ресурс по наработке расходомеров теплоносителя. Возникает задача о наилучшем использовании этого ресурса. В работе приводится математическая модель прогнозирования изменения ресурса расходомеров с учетом вероятности их выхода из строя и технологические ограничения на максимальную наработку. Рассматриваются различные стратегии использования ресурса расходомеров в соответствии с планом последовательного вывода энергоблоков из эксплуатации. В результате численных исследований выбирается наилучшая стратегия. Показано, что эффект экономии новых расходомеров зависит от назначенного максимального времени эксплуатации расходомера и может составлять от 40 до 100 %.

Ключевые слова: расходомер, ядерный энергоблок, вывод из эксплуатации, наработка, математическая модель, РБМК, планово-предупредительный ремонт.

Введение

При выводе из эксплуатации ядерных энергоблоков АЭС возникает целый комплекс задач, связанных с обеспечением безопасности процесса вывода из эксплуатации, а также оптимизацией использования остаточных ресурсов с целью экономии затрат на остающихся в работе энергоблоках [1–3].

К остаточным ресурсам относятся как энергоресурсы топлива в остановленном реакторе, так и невыработанный рабочий ресурс различного оборудования и приборов.

Чаще всего рассматриваются задачи экономии энергоресурса топлива за счет дожигания топлива в продолжающих работу реакторах. Например, в работах [4, 5] рассмотрен весь жизненный цикл РБМК от начальной загрузки до его остановки и использования недогоревшего топлива в других реакторах этой же АЭС. Показано, что повторное использование отработавшего топлива позволяет сэкономить значительное количество свежего топлива, от десятков до сотен и даже тысяч топливных сборок.

Вместе с тем, на остановленных энергоблоках может находиться оборудование, приборы, различного рода комплектующие, датчики и др., которые могут быть использованы в работающих энергоблоках, но имеющие определенный лимит на наработку или сроки годности. В этом случае возникает задача об оптимальной стратегии использования ресурса с учетом имеющегося графика вывода из эксплуатации оставшихся энергоблоков.

✉ А.С. Ястребов: yastrebostuff@gmail.com

Поступила в редакцию: 27.02.2025

После доработки: 12.03.2025

Принята к публикации: 18.03.2025

Для этой цели необходимо разработать математическую модель, которая позволяла бы прогнозировать изменение ресурса конкретного типа оборудования (или его элементов), приборов и др. в работающих энергоблоках и на основе использования математической модели решать задачи по наилучшему использованию ресурса.

В данной работе в качестве примера рассматривается постановка и решение задачи о наилучшем использовании расходомеров из остановленного реактора РБМК в продолжающих работу энергоблоках (отметим, что расходомеры остановленного реактора не являются радиоактивными, и технически возможно их использование).

Расход теплоносителя в реакторах типа РБМК является важнейшим лимитирующим параметром, определяющим безопасную работу реактора [5]. В реакторах канального типа, к которым относится реактор РБМК, контроль расхода теплоносителя осуществляется в каждом канале. Для работы при высоких температурах теплоносителя в технологических каналах контура многократной принудительной циркуляции разработан шариковый аксиальный расходомер ШТОРМ-32М, для измерения расхода в каналах системы управления и защиты – ШТОРМ-8А [6, 7]. В настоящее время на действующих энергоблоках АЭС с реакторами РБМК находятся в эксплуатации более 8000 расходомеров типа ШТОРМ-32М и около 1200 расходомеров типа ШТОРМ-8А. На рис. 1 представлена принципиальная конструкция шарикового расходомера ШТОРМ.

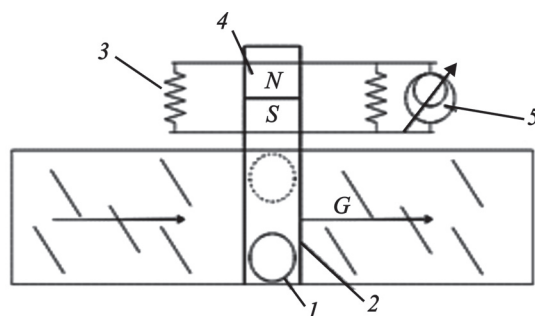


Рис. 1. Принципиальная конструкция расходомера ШТОРМ: 1 – ферромагнитный шарик; 2 – дорожка качения; 3 – индукционная катушка; 4 – магнит; 5 – измеритель тока

В состав комплектов расходомеров ШТОРМ входят датчики расхода ШАДР (упрощенно шарик и дорожка качения), МИП – магнитоиндукционные преобразователи частоты вращения шарика в электрический сигнал (магнит, индукционная катушка, измеритель сигнала).

Принцип измерения расхода заключается в следующем. Поток жидкости, проходя закручивающий аппарат с переменным по длине винтовым шагом, приобретает вращательное движение и обеспечивает вращение шара 1 по дорожке качения 2. При пересечении силовых линий магнита 4 шариком 1 в катушке 3 возникает ЭДС индукции, амплитуда сигнала зависит от скорости вращения шарика, а, следовательно, от расхода теплоносителя. Средний срок службы ШТОРМ-32М – 50000 ч, ШТОРМ-8А – 30000 ч¹. Шариковые расходомеры имеют ряд достоинств по сравнению с расходомерами переменного перепада давления.

Однако имеются и недостатки: необходимость индивидуальной градуировки, зависимость показаний шарикового расходомера от вязкости жидкости, деформации шарика, изношенности дорожки качения и др. [7]. При длительной эксплуатации расходомеров встает вопрос об их надежности с точки зрения временной стабильности их метрологических характеристик и безотказности работы. На практике проверка правильности работы расходомеров производится четыре раза между ППР (плано-

¹ Описание типа средства измерений. Расходомеры шариковые ШТОРМ-8А и ШТОРМ 32-М. Приложение к Свидетельству № 51060 об утверждении типа средств измерений. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ktopoverit.ru/prof/opisanie/5706-13.pdf> (дата обращения: 20.12.2024).

во-предупредительными ремонтами) штатным средством «Измерительно-вычислительным комплексом диагностики шариковых расходомеров» (ИВК ДШР) в соответствии с выбранными критериям отбраковки. Отбракованные расходомеры заменяются на новые во время проведения ППР. Во время проведения ППР происходит также замена расходомеров, исчерпавших ресурс по наработке. Во время проведения ППР энергоблока в среднем из почти 1700 расходомеров заменяется порядка 100. В силу того, что за время эксплуатации ежегодно происходит замена десятков расходомеров во время ППР, одновременно в энергоблоке находятся расходомеры, имеющие разное время эксплуатации (наработки).

На рис. 2 приведены гистограммы распределения количества расходомеров по наработке в часах для разных энергоблоков АЭС с реакторами РБМК.

На рис. 3 приведены доли отбракованных по результатам диагностики расходомеров в зависимости от наработки в часах.

Из приведенных эксплуатационных данных видно, что распределение расходомеров по наработке неравномерно и зависит от конкретного энергоблока. Вероятность замены расходомера по неисправности при этом в среднем порядка 0.2.



Рис. 2. Распределение числа расходомеров по наработке для разных энергоблоков АЭС с реакторами РБМК

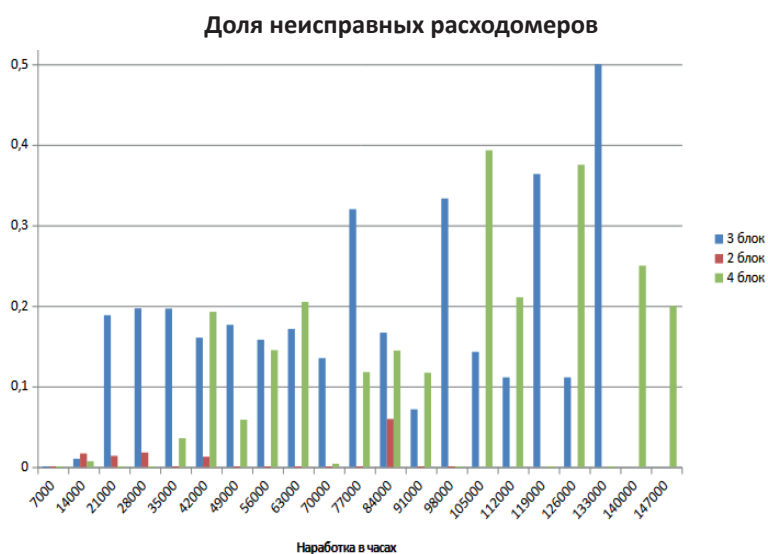


Рис. 3. Доля неисправных расходомеров для разных энергоблоков

Постановка задачи

Известен график вывода из эксплуатации энергоблоков с реакторами РБМК, например, 2 блок – 2028 г., 3 блок – 2033 г. (1 блок выведен из эксплуатации в 2023 г.). В выводимых из эксплуатации энергоблоках у расходомеров имеется ресурс по наработке. Отсюда возникает задача: каким образом использовать ресурс по наработке расходомеров, чтобы суммарная наработка расходомеров на момент вывода АЭС из эксплуатации была максимальна? Это равнозначно экономии новых расходомеров (с нулевой наработкой) в процессе вывода энергоблоков АЭС из эксплуатации. Для решения этой задачи необходимо создать математическую модель для прогноза распределения расходомеров по наработке (или в дальнейшем «спектра расходомеров по наработке») в действующих энергоблоках.

Математическая модель динамики спектра расходомеров по наработке

Пусть ядерный энергоблок с начала эксплуатации проработал k лет, а значит, был проведено k планово-предупредительных ремонтов, при которых часть расходомеров заменялась новыми. Рассмотрим спектр расходомеров по наработке на момент выхода в эксплуатацию после ППР (см. рис. 2). Судя по приведенным данным, максимальная наработка $\tau_{\max}$ 150000 ч. Разобьем эту ось на M интервалов (рис. 4). Величина каждого интервала равна числу часов работы реактора между ППР (порядка 8000) ч.

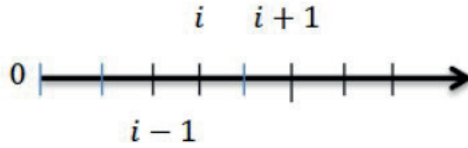


Рис. 4. Ось наработок

Баланс расходомеров в i -м внутреннем интервале наработок $2 \leq i < M$ в момент начала работы после k -го ППР будет

$$N_i^{(k)} = N_{i-1}^{(k-1)} - p_i^{(k-1)} N_{i-1}^{(k-1)} = (1 - p_i^{(k-1)}) N_{i-1}^{(k-1)}. \quad (1)$$

Смысл формулы следующий.

В i -й интервал наработки после k -го ППР перейдут за счет увеличения наработки расходомеры из $(i-1)$ интервала после $(k-1)$ ППР, за исключением тех, которые были извлечены как неисправные после $(k-1)$ ППР, а именно: $p_i^{(k-1)} N_{i-1}^{(k-1)}$, где $p_i^{(k-1)}$ – вероятность выгрузки по неисправности.

Для $i=1$ будет прибыль расходомеров с нулевой наработкой:

$$N_1^{(k)} = \Delta N^{(k)}. \quad (2)$$

Для последнего интервала $i=M$:

$$N_M^{(k)} = (1 - p_M^{(k)}) N_M^{(k-1)}. \quad (3)$$

Причем, $p_M^k = 1$, для всех k все расходомеры настолько выработали ресурс, что в этом интервале наработок их нет. Отметим, реальный ресурс значительно превышает средний (как видно из рис. 2), и расходомеры меняются по результатам диагностики.

Исходя из условия сохранения числа расходомеров, получим, что число расходомеров с нулевой наработкой должно равняться числу удаленных по результатам диагностики, т.е.:

$$N_1^{(k)} = \sum_{i=2}^M p_i^{(k-1)} N_{i-1}^{(k-1)}. \quad (4)$$

Таким образом, получим следующую систему уравнений для определения спектра на k -м ППР:

$$\begin{cases} N_1^{(k)} = \sum_{i=2}^M p_i^{(k-1)} N_{i-1}^{(k-1)} \\ N_i^{(k)} = (1 - p_i^{(k-1)}) N_{i-1}^{(k-1)} & 2 \leq i \leq M \\ N_M^{(k)} = (1 - p_M^{(k)}) N_M^{(k-1)} & p_M^{(k)} = 1 \text{ для } \forall k. \end{cases} \quad (5)$$

Начальное условие: $N_i^{(k-1)} = N_i^{(0)}$.

Численные исследования различных стратегий использования ресурсов расходомеров

Разработанная математическая модель легла в основу программного комплекса, позволяющего оценивать различные стратегии использования расходомеров из остановленного энергоблока в работающих. Созданный на базе математической модели программный комплекс позволяет реализовать различные стратегии использования ресурсов расходомеров при реализации заданного графика вывода из эксплуатации АЭС. Рассматривались следующие варианты (рис. 5):

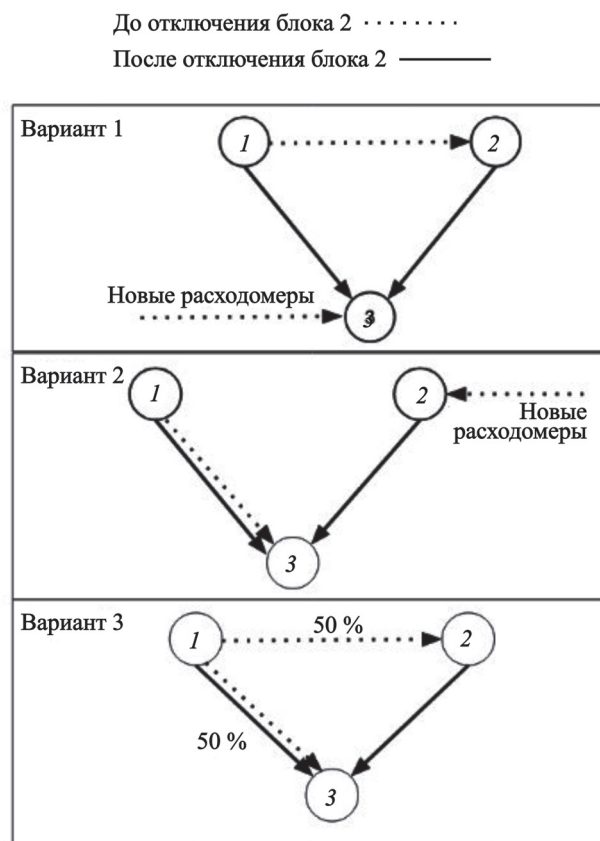


Рис. 5. Визуализация стратегий

Вариант 1

1. Расходомеры из блока 1 загружаются в блок 2.
2. Расходомеры в блоке 3 заменяются только новыми.
3. После отключения блока 2 исправные расходомеры из него вместе с оставшимися расходомерами из блока 1 начинают подгружаться в блок 3.

Вариант 2

1. Расходомеры из блока 1 сразу направляются в блок 3.
2. Для блока 2 применяются только новые расходомеры.
3. После отключения блока 2 исправные расходомеры из него продолжают использоваться в блоке 3 вместе с расходомерами из блока 1.

Вариант 3

1. Расходомеры из блока 1 распределяются на две равные части между блоками 2 и 3.
2. После отключения блока 2 оставшиеся исправные расходомеры из него начинают подгружаться в блок 3.

На начало планирования блок 1 остановлен, блоки 2 и 3 предполагается остановить, соответственно через 5 и 10 лет. Отметим, что во всех случаях из остановленных энергоблоков извлекаются на замену расходомеры с наименьшей наработкой к моменту замены. Если в остановленных энергоблоках 1 и 2 расходомеры заканчиваются раньше, чем иссякает потребность в расходомерах из этих блоков для использования в блоке 3, то вместо них используются новые расходомеры.

Для каждой стратегии были проведены расчеты, при этом предполагалось, что вероятность выхода расходомера из строя линейно зависит от наработки. Основные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Итоги численных расчетов для трех стратегий при различных ограничениях на наработку $T_{\max}$

Номер стратегии	Экономия расходомеров, %		
	$T_{\max} = 50$ тыс. ч	$T_{\max} = 75$ тыс. ч	$T_{\max} = 100$ тыс. ч
1	31	61	66
2	31	66	60
3	12	30	100

Заключение

В данной работе исследована возможность использования ресурса по наработке расходомеров в энергоблоках с реакторами РБМК-1000 при выводе АЭС из эксплуатации. Разработана математическая модель прогноза изменения спектра по наработке расходомеров с учетом вероятности выхода расходомеров из строя. Поставлена задача по поиску наилучшей стратегии использования остаточного ресурса расходомеров при выводе АЭС из эксплуатации. Рассмотрены три возможные стратегии, и показана их эффективность в плане экономии новых расходомеров. Каждый из рассмотренных вариантов дает экономию в среднем порядка 40–60 % новых расходомеров, что составляет величину около 600 расходомеров. Разработанная математическая модель может быть применена для исследования эффективности использования остаточного ресурса по наработке и других приборов и устройств при выводе АЭС из эксплуатации.

Финансирование

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

Конфликт интересов

Конфликт интересов отсутствует.

Вклад авторов

Загребаев А. М. – разработка математической модели; формулировка идеи и целей исследования, постановка задачи, выбор методов исследования; подбор литературных источников.

Евстюхина Е. В. – анализ нормативной базы; постановка эксперимента; разработка концепции исследования.

Ястребов А. С. – анализ нормативной базы; выполнение экспериментальных работ, обработка результатов; проведение численных расчетов; редактирование текста статьи.

Андреев М. Г. – первичная обработка результатов исследования; участие в проведении исследования

Список литературы

1. Кузнецов В.М., Юрчевский Е.Б., Амерханов Р.А., Спиридонов В.П. Вопросы обеспечения безопасности и технические аспекты вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии // Энергосбережение и водоподготовка, 2022. № 2 (136). С. 57–69.
2. Хомяков Д.Н., Меньшиков В.Ф. Снятие с эксплуатации энергоблоков АЭС // Сб. докладов Всероссийской конференции «Энергетика России в 21 веке: проблемы и научные основы устойчивого и безопасного развития», Иркутск, 14–17 сентября 2000 г. Иркутск, 2000.
3. Канашов Б.А., Кузьмин И.В., Костюченко А.Н., Перепелкин С.О., Чесанов В.В. Оценка остаточного ресурса ТВС из остановленных энергоблоков РБМК-1000 для дожигания на действующих энергоблоках АЭС // Сб. докладов X Международного форума «Безопасность ядерных технологий: транспортирование радиоактивных материалов – «Атомтранс-2015», С.-Петербург, 5–9 октября 2015 г. СПб., 2015.
4. Федосов А.М. Оптимальное использование топлива при выводе АЭС с РБМК из эксплуатации // Атомная энергия, Т. 102. Вып. 5. С. 284–290.
5. Краюшкин А.В., Новиков В.Г., Федосов А.М., Ушпурас Е., Римкявичус С., Кривошеин Г.С. Оптимальное дожигание топлива 1-го энергоблока в реакторе 2-го энергоблока Игналинской станции // Физические проблемы топливных циклов ядерных реакторов. Материалы XIV семинара по проблемам физики реакторов. Москва, 4–8 сентября 2006 г. М.: МИФИ, 2006. С. 100–102.
6. Абрамов М.А., Авдеев В.И., Адамов Е.О. и др. Канальный ядерный энергетический реактор РБМК. М.: ГУП НИКИЭТ, 2006. С. 632.
7. Лысков Б.В., Прозоров В.К. Термометрия и расходомерия ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 120 с.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2025, vol. 14, no. 2, pp. 149–156

Mathematical modeling and strategy for utilizing the remaining resource of flow meters in shutdown RBMK power units during the decommissioning of nuclear power plants

A. M. Zagrebaev¹, E. V. Evstyukhina¹, A. S. Yastrebov^{1,✉}, M. G. Andreev²

¹ National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, 115409, Russia

² Kursk NPP – Branch of JSC «Rosenergoatom Concern», Kurchatov, Kursk Region, 307250, Russia

✉ yastrebovstuff@gmail.com

Received February 27, 2025; revised March 12, 2025; accepted March 18, 2025

During the decommissioning of nuclear power units with RBMK reactors, in addition to the energy resource of unburned fuel, there remains an unutilized operational resource (service life) of instruments, equipment elements, and other components in the shutdown units. Under certain conditions, this resource can be used in operating power units. An example of this is the remaining service life of coolant flow meters. The problem arises of optimizing the utilization of this resource. This study presents a mathematical model for predicting changes in the service life of flow meters, considering the probability of their failure and technological constraints on maximum operating hours. Various

strategies for using the flow meter resource are examined in accordance with the planned sequential decommissioning of power units. Numerical studies allow the selection of the optimal strategy. It is shown that the savings effect from reusing flow meters depends on the assigned maximum operational time and can range from 40 to 100 %.

Keywords: flow meter, nuclear power unit, decommissioning, service life, mathematical model, RBMK, preventive maintenance.

References

1. *Kuznetsov V.M., Yurchevsky E.B., Amerkhanov R.A., Spiridonov V.P.* Voprosy obespecheniya bezopasnosti i tekhnicheskie aspekty vyvoda iz ekspluatatsii ob'ektov ispol'zovaniya atomnoy energetiki [Issues of safety assurance and technical aspects of decommissioning nuclear energy facilities]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*, 2022. No. 2 (136). Pp. 57–69 (in Russian).
2. *Khomyakov D.N., Menshikov V.F.* Snyatie s ekspluatatsii energoblokov AES [Decommissioning of nuclear power plant units]. *Sbornik dokladov Vserossiyskoy konferentsii «Energetika Rossii v XXI veke: problemy i nauchnye osnovy ustoychivogo i bezopasnogo razvitiya»*, Irkutsk, 14–17 sentyabrya 2000. [Collection of reports of the All-Russian conference «Energy of Russia in the 21st century: problems and scientific foundations of sustainable and safe development», Irkutsk, September 14–17, 2000], Irkutsk. 2000 (in Russian).
3. *Kanashov B.A., Kuzmin I.V., Kostyuchenko A.N., Perepelkin S.O., Chesanov V.V.* Otsenka ostatochnogo resursa TVS iz ostanovlennykh energoblokov RBMK-1000 dlya dozhiganiya na deystvuyushchikh energobloках AES [Assessment of the remaining resource of fuel assemblies from shutdown RBMK-1000 power units for further burning in operating NPP units]. *Sbornik dokladov X Mezhdunarodnogo foruma «Bezopasnost' yadernykh tekhnologiy: transportirovanie radioaktivnykh materialov – Atomtrans-2015»*, S.-Peterburg, 5–9 oktyabrya 2015 g. [Collection of reports of the X International Forum «Safety of Nuclear Technologies: Transportation of Radioactive Materials – «Atomtrans-2015», St. Petersburg, October 5–9, 2015]. St. Petersburg, 2015 (in Russian).
4. *Fedosov A.M.* Optimal'noe ispol'zovanie topliva pri vyvode AES s RBMK iz ekspluatatsii [Optimal fuel utilization during the decommissioning of RBMK nuclear power plants]. *Atomnaya energiya*, Vol. 102, Iss. 5. Pp. 284–290 (in Russian).
5. *Krayushkin A.V., Novikov V.G., Fedosov A.M., Ushpuras E., Rimkyavichus S., Krivoshein G.S.* Optimal'noe dozhiganie topliva 1-go energobloka v reaktore 2-go energobloka Ignalinskoy stantsii [Optimal fuel burning of the first unit in the reactor of the second unit of the Ignalina NPP]. *Fizicheskie problemy toplivnykh tsiklov yadernykh reaktorov. Materialy XIV seminar po problemam fiziki reaktorov*, Moskva, 4–8 sentyabrya 2006 g. [Physical Problems of Nuclear Reactor Fuel Cycles. Proceedings of the XIV Seminar on Reactor Physics Problems. Moscow, September 4–8, 2006]. MEPhI, 2006. Pp. 100–102 (in Russian).
6. *Abramov M.A., Avdeev V.I., Adamov E.O., et al.* Kanal'nyy yadernyy energeticheskiy reaktor RBMK [RBMK Channel-Type Nuclear Power Reactor]. Moscow, GUP NIKIET Publ., 2006. P. 632 (in Russian).
7. *Lysikov B.V., Prozorov V.K.* Termometriya i raskhodometriya yadernykh reaktorov [Thermometry and Flow Measurement of Nuclear Reactors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. P. 120 (in Russian).