

ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ


NUCLEAR, RADIATION AND ENVIRONMENTAL SAFETY

УДК 621.039.564
DOI 10.26583/gns-2023-02-03
EDN PJXECW

Предиктивная диагностика расходомеров реактора РБМК

А.М. Загребаев , Е.О. Попов  

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

 popov.egoriy@yandex.ru

Аннотация. На данный момент в эксплуатации находится 8 реакторов типа РБМК. Безопасность их эксплуатации обеспечивается за счет приборов контроля за ключевыми показателями. В данной статье основное внимание уделяется именно контролю расхода теплоносителя через топливный канал, осуществляемому с помощью шариковых расходомеров типов ШТОРМ-32М и ШТОРМ-8А. В процессе эксплуатации происходит постепенный износ дорожки качения и шара, что приводит к появлению у прибора отрицательной погрешности, другими словами, показания становятся заниженными. В связи с этим, а также по причине широкого применения шариковых расходомеров на АЭС, актуальной является задача диагностики состояния расходомеров. Одним из подходов к определению расхода теплоносителя является подход, основанный на измерении и использовании информации об активности теплоносителя системой контроля герметичности оболочек ТВЭЛ (СКГО). Использование данного радиационного подхода контроля расхода теплоносителя имеет свои достоинства и сложности. Достоинством является то, что привлекается реальная экспериментальная информация о наличии теплоносителя в топливном канале, а сложности связаны с получением и обработкой сигналов СКГО в реальном режиме времени и вследствие этого с низкой оперативностью решения задачи. В данной работе предлагается методика расчетной предиктивной диагностики состояния расходомера, использующей конструктивные особенности контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ) реактора. В качестве диагностического параметра был выбран адаптационный параметр модели K_i . Исследования показали, что рост дисперсии по времени в экспериментальных значениях расхода оказывает явное влияние на выбранный диагностический признак K_i , вследствие чего можно говорить о том, что наблюдение в экспериментальных данных такого рода изменения дисперсии может служить признаком неисправности расходомера.


Ключевые слова: АЭС, РБМК, шариковый расходомер, ШТОРМ-32М, ШТОРМ-8А, расход теплоносителя, ИВК ДШР, СКГО, ТВЭЛ, диагностический признак.

Для цитирования: Загребаев А.М., Попов Е.О. Предиктивная диагностика расходомеров реактора РБМК. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(2):24–30. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-03>

Predictive diagnostics of RBMK reactor flowmeters

Andrey M. Zagrebaev , Egor O. Popov  

National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

 popov.egoriy@yandex.ru

Abstract. At the moment, there are 8 reactors of the RBMK type in operation. The safety of their operation is ensured by monitoring devices for key indicators. In this article, the main attention is paid to the control of the coolant flow through the fuel channel, carried out with the help of ball flow meters of the STORM-32M and STORM-8A types. During operation, there is a gradual wear of the raceway and the ball, which leads to the appearance of a negative error in the device, in other words, the readings become underestimated. In this regard, as well as due to the widespread use of ball flowmeters at nuclear power plants, the task of diagnosing the state of flowmeters is urgent. One of the approaches to determining the flow rate of the coolant is an approach based on the measurement and use of information about the activity of the coolant by the tightness control system of the fuel element shells (SKGO). The use of this radiation approach to control the flow of coolant has its advantages and difficulties. The advantage is that real experimental information about the presence of a coolant in the fuel channel is involved, and the difficulties are associated with receiving and processing the signals of the SKGO in real time and, consequently, with low efficiency of solving the problem. In this paper, we propose a method for predictive diagnostics of the flow meter condition using the design features of the multiple forced

circulation circuit (CMPC) of the reactor. The adaptive parameter of the K_i model was selected as a diagnostic parameter. Studies have shown that the increase in time variance in experimental flow values has a clear effect on the selected diagnostic feature K_i , as a result of which it can be said that the observation of this kind of variance change in experimental data can serve as a sign of a malfunction of the flow meter.

Keywords: NPP; RBMK; ball flow meter; STORM-32M; STORM-8A; coolant flow rate; measuring and computing complex for diagnostics of ball flow meters; SKGO; fuel rod; diagnostic feature.

For citation: Zagrebaev A.M., Popov E.O. Predictive diagnostics of RBMK reactor flowmeters. *Global nuclear safety*. 2023;13(2):24-30 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-03>

Введение

На данный момент в эксплуатации находятся 8 реакторов РБМК, безусловно, безопасность их эксплуатации – одна из важнейших задач. Для этой цели разработан целый комплекс средств контроля [1,2]. Одним из контролируемых параметров является расход теплоносителя через топливный канал. Контроль осуществляется с помощью шариковых аксиальных расходомеров ШТОРМ-32М, предназначенных для работы при высоких температурах теплоносителя в технологических каналах первого контура АЭС с реакторами РБМК. Однако в процессе эксплуатации происходит постепенный износ дорожки качения и шара, что приводит к появлению у прибора отрицательной погрешности, другими словами, показания становятся заниженными. Это, в свою очередь, приводит к тому, что расход теплоносителя через канал превышает расчетный [3].

В связи с этим, а также по причине широкого применения шариковых расходомеров на АЭС, актуальной является задача диагностики состояния расходомеров. В настоящее время на АЭС диагностика проводится измерительно-вычислительным комплексом диагностики шариковых расходомеров (ИВК ДШР). ИВК ДШР подключается к измерительному каналу, считывает генерируемый электрический сигнал с магнитоэлектрического преобразователя, частота которого пропорциональна расходу. Диагностика проводится для оценки технического состояния расходомеров с целью своевременной их замены во время ремонта. Диагностика проводится 4 раза:

- после пуска;
- в середине между ремонтами;
- два раза перед остановом с перерывом в 1-2 недели.

Вместе с тем, в межремонтный период иногда возникают дефекты, которые не проявляли себя во время диагностики. К таким дефектам относятся останов вращения шарика ШАДР, загрязнение в канавке качения ШАДР и т.п.

Таким образом, актуальной является задача непрерывной диагностики и прогнозирования состояния расходомеров в процессе эксплуатации в межремонтный период.

Вообще говоря, методика прогнозирования технического состояния любого объекта должна отображать следующую последовательность действий [4]:

1. Разработка математической модели объекта и на ее основе определение набора наиболее значимых параметров и характеристик объекта, определение набора диагностических признаков объекта (ДП), оценка диапазонов допустимых значений ДП, при нахождении объекта в работоспособном состоянии и др.;

2. Построение диагностической модели (ДМ) объекта, получение аналитических зависимостей между непосредственно измеряемыми величинами и ДП объекта, анализ возможностей идентификации полного набора ДП и создание для целей идентификации расчетной программы.

Под диагностическим признаком объекта понимается структурный параметр или характеристика, изменение которой под влиянием внешних факторов и режимов работы оказывает наибольшее влияние на рабочие функции контролируемого объекта.

В качестве диагностической модели объекта предлагается рассматривать модель, в которой связываются диагностические признаки и величины, непосредственно измеряемые в процессе диагностирования.

Таким образом, при контроле технического состояния предлагается выполнить переход из пространства рабочих функций в пространство диагностических признаков, в котором и отслеживается степень приближения объекта к своему предельному состоянию (запас работоспособности) по каждому из этих признаков. Это позволяет подойти к решению задачи оценки остаточного ресурса.

Понятно, что решение этой задачи практически невозможно без использования архивов эксплуатационных параметров, в которых, по сути, содержится вся «жизнь энергоблока». В настоящее время архивы технологических параметров ведутся на всех АЭС с реакторами РБМК и ВВЭР. И задача в этом случае заключается в построении диагностической модели на базе синтеза математической модели, результатов измерений и архивной информации.

Обзор методики определения расхода, опирающейся на информацию об активности теплоносителя

Одним из подходов к определению расхода теплоносителя является подход, основанный на измерении и использовании информации об активности теплоносителя [5].

Суть радиационного подхода заключается в следующем: из отечественной и иностранной литературы известно, что наведенная активность теплоносителя зависит от величины плотности потока быстрых нейтронов, следовательно, от мощности, а в точке измерения активности от времени доставки, т.е. при известном расстоянии – от расхода теплоносителя. Таким образом, величина азотной активности теплоносителя несет в себе информацию и о мощности, и о расходе. Этот факт привлек внимание исследователей более 30 лет назад применительно к корпусным реакторам с водой под давлением. Были созданы и внедрены в эксплуатацию информационные измерительные системы, основанные на этом принципе, позволяющие с высокой точностью определять основные лимитирующие параметры (для расхода теплоносителя первого контура относительная погрешность составляет 2-3%, для тепловой мощности 1,5-2%).

Успешное внедрение контрольно-информационных систем на основе азотной активности на АЭС с реакторами типа ВВЭР вызвало стремление использовать данный информационный канал и на энергоблоках с реакторами типа РБМК. К сожалению, на реакторах типа РБМК нет специальной системы контроля за наведенной активностью теплоносителя. Для этой цели может быть использована система контроля герметичности оболочки ТВЭЛ (СКГО). Вообще говоря, СКГО предназначена для обнаружения канала с увеличенной активностью пароводяной смеси за счет осколков деления в случае нарушения герметичности оболочек ТВЭЛ по соотношению активности коротко- и долгоживущих продуктов деления. Однако, в определенном энергетическом диапазоне (более 3,5 МэВ) эта система фиксирует и наведенную активность теплоносителя за счет реакции $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}_7$.

При этом математические модели активации и методы определения расхода теплоносителя, используемые в реакторах с водой под давлением для реакторов РБМК не применимы. Обусловлено это как кипением воды в канале, так и конструкцией СКГО. Между тем данный подход успешно разрабатывался сотрудниками НИЯУ МИФИ [6,7].

Использование данного радиационного подхода контроля расхода теплоносителя имеет свои достоинства и сложности. Достоинством является то, что привлекается реальная экспериментальная информация о наличии теплоносителя в топливном канале, а сложности связаны с получением и обработкой сигналов СКГО в реальном

режиме времени и вследствие этого с низкой оперативностью решения задачи (раз в сутки, не нарушая штатного режима работы СКГО).

Предлагаемая методика определения расхода

Численный анализ архива эксплуатационных параметров показал, что функция расхода теплоносителя весьма неоднородна, что представляет сложности для ее последующей аппроксимации и экстраполяции. То же самое можно сказать и о функции мощности. Также выявлена отрицательная корреляция мощности и расхода, другими словами, увеличение мощности ведет к уменьшению расхода. Важно отметить, что данные зависимости были выявлены при неизменном значении лимба запорно-регулирующего клапана (ЗРК), т.к. его изменение влечет изменения в выше обозначенных параметрах

Таким образом, с целью учета выявленных зависимостей в параметрах, а также в целях повышения оперативности по сравнению с радиационным подходом, можно диагностировать и прогнозировать состояние расходомера в непрерывном режиме между «прокатками СКГО» расчетным путем за счет использования математической модели теплогидравлического тракта и накопленного архива эксплуатационных параметров. Важно при этом понимать, что расчетный прогноз должен, в конечном счете, проверяться ежесуточно экспериментально радиационным способом на основе данных СКГО.

В данной работе предлагается методика расчетной предиктивной диагностики состояния расходомера.

Методика использует конструктивные особенности контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ) реактора, схематично изображенного на рисунке 1. Активная зона (АЗ) реактора разделена на две половины, в каждую из которых теплоноситель подается из напорного коллектора (НК) и после прохождения по каналам АЗ собирается в барабане-сепараторе (БС).

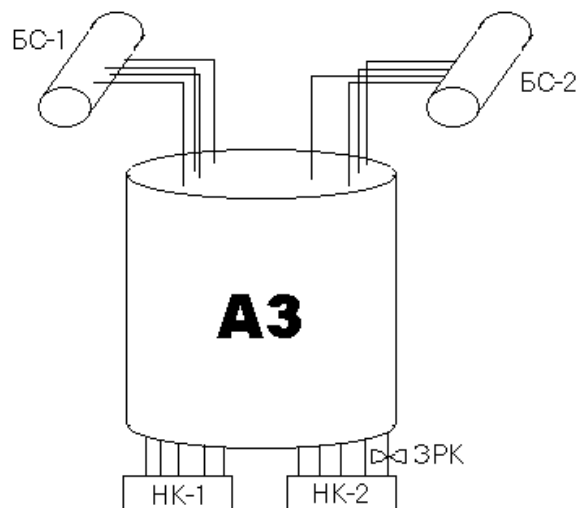


Рисунок 1. Схематичный фрагмент КМПЦ реактора РБМК
Figure 1. Schematic fragment of the multiple forced circulation circuit of the RBMK reactor

Разность давления между НК и БС для всех каналов каждой из половин АЗ одинакова и выражается следующей формулой (1):

$$\Delta P_{\text{экс}} = P_{\text{НК}} - P_{\text{БС}} . \quad (1)$$

В формуле (1) давления на НК и БС измеряется штатными средствами измерения давления.

Вместе с тем существует математическая модель гидродинамики канала, которая позволяет определить гидродинамическую характеристику каждого i – го топливного канала и связать перепад давлений в канале с мощностью канала и расходом теплоносителя через него $\Delta P(G_i, W_i)$. Для учета падения давления на местном сопротивлении после НК и до входа в топливный канал, например, на запорно-регулирующем клапане (ЗРК), вводится поправка $K_i G_i^2$.

Таким образом, перепад давлений для каждого канала можно записать выражением (2):

$$\Delta P_{\text{экс}} = \Delta P(G_i, W_i) + K_i G_i^2. \quad (2)$$

Понятно, что при измеренном значении $\Delta P_{\text{экс}}$, известной мощности W_i , можно определять либо расход при известном коэффициенте K_i , либо коэффициент K_i при известном расходе теплоносителя G_i .

Отсюда вытекает возможность выбора диагностического параметра. Если в качестве диагностического параметра выбран полученный по математической модели (2) расход $G_{\text{имод}}$, то следующим этапом требуется его сравнение с измеренным расходом $G_{\text{изм}}$ по какому-либо алгоритму. Если в качестве диагностического параметра выбран коэффициент K_i , то он также определяется из выражения (2) по известным значениям мощности и измеренным значениям $G_{\text{изм}}$ и $\Delta P_{\text{экс}}$ из архива эксплуатационных параметров и сравнивается с текущим значением. Исследования на реальных данных показали, что этот подход более эффективен.

Суть предлагаемой методики заключается в реализации трех этапов:

1. Для каждого канала из архива выбираются временные интервалы, в течение которых не менялось проходное сечение ЗРК;
2. Используя программу теплогидравлического расчета «ГИДРА» и измеренные перепады давления между напорным коллектором и барабан-сепаратором, определяется временная последовательность значений $K_i(t)$;
3. Временная последовательность $K_i(t)$ представляет собой временной ряд диагностического параметра и может исследоваться различными известными методами анализа и прогноза временных рядов [8].

Обсуждение результатов применения предлагаемой методики

В данной работе предлагается следующий алгоритм: архивный временной ряд сглаживается фильтром скользящего среднего и устанавливается апертура – пределы изменения адаптационного параметра $K_i(t)$. Выход текущего значения $K_i(t)$ за апертуру диагностируется как ошибочное значение измеряемого расхода.

Одним из признаков неисправности расходомера может быть рост дисперсии результатов измерений [3]. С целью проверки влияния роста дисперсии на выбранный диагностический признак $K_i(t)$, к реальным значениям расхода теплоносителя в архивных данных ядерного энергоблока Смоленской АЭС за февраль 2016 года, начиная с 10 числа, добавлялась помеха с растущей во времени дисперсией. Исходя из предложенного выше алгоритма, влияние фиксируется в случае выхода $K_i(t)$ за апертуру.

В качестве апертуры были выбраны минимальное и максимальное значения K , полученные по неискаженным данным. К 19 февраля дисперсия выросла более чем на 80% относительно значения на 10 число этого же месяца. Из рисунка 2 видно, что искажение, внесенное в значение расхода, привело к тому, что 19 февраля K превысило верхнюю апертуру.

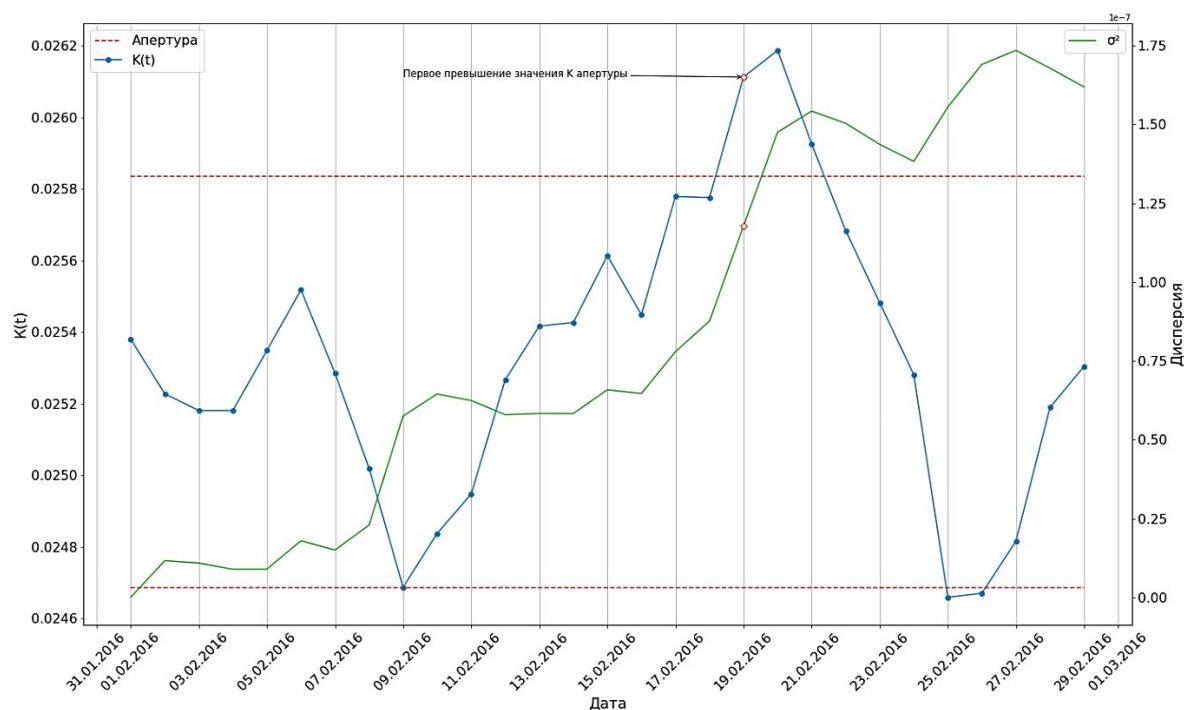


Рисунок 2. График роста дисперсии $K(t)$ в канале 63-22
Figure 2. Graph of $K(t)$ variance growth in channel 63-22

Выход за апертуру в свою очередь говорит о возможной неисправности расходомера.

Выводы

В силу того, что результаты для других каналов качественно совпадают, можно сделать вывод о том, что рост дисперсии по времени в экспериментальных значениях расхода оказывает явное влияние на выбранный диагностический признак $K_i(t)$, вследствие чего можно говорить о том, что наблюдение в экспериментальных данных такого рода изменения дисперсии, может служить признаком неисправности расходомера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Доллежалъ Н.А., Емельянов И.Я. Канальный ядерный энергетический реактор. Москва: Атомиздат; 1980. 208 с. URL : http://elib.biblioatom.ru/text/dollezhal_kanalnyy-yadernyy-reaktor_1980/go,4/ (дата обращения: 09.11.2022).
2. Абрамов М.А., Авдеев В.И., Адамов Е.О. и др. Канальный ядерный энергетический реактор РБМК : монография; под общей ред. Ю.М. Черкашова. Москва: ГУП НИКИЭТ; 2006. 631 с. URL: <https://cat.gpntb.ru/?id=EC/ShowFull&irbDb=KATBW&bid=Ж2-06/38105> (дата обращения: 05.01.2023).
3. Лысыков Б.В., Прозоров В.К. Термометрия и расходомерия ядерных реакторов. Москва: Энергоатомиздат; 1985. 119 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_001248090/ (дата обращения: 09.11.2023).
4. Панкин А.М. Методология разработки алгоритмов контроля технического состояния непрерывных объектов. В кн.: Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», 2016. 2016;1:56–59. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologiya-razrabotki-algoritmov-kontrolya-tehnicheskogo-sostoyaniya-nepriyryvnyh-obektov> (дата обращения: 06.03.2023).
5. Агапов С.А., Лысенко В.В., Мусорин А.И., Цыпин С.Г. Радиационные методы измерения параметров ВВЭР; под ред. С.Г. Цыпина. Москва: Энергоатомиздат; 1991. 129 с. https://rusneb.ru/catalog/004191_000025_DONPB-DGPB%7C%7C%7CRETRO6%7C%7C%7C0000001397/ (дата обращения: 09.11.2022).
6. Загребяев А.М., Костанбаев С.В., Овсянникова Н.В. и др. Контроль расхода в технологическом канале РБМК на основе информации об активности теплоносителя. Атомная энергия. 2010;2:82–85. URL: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1480> (дата обращения: 09.11.2022).

7. Загребаяев А.М., Костанбаев С.В., Овсянникова Н.В. Расчетно-измерительный комплекс контроля расхода в канале реактора РБМК на основе информации об активности теплоносителя. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2010;(1):138–145. URL: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2010/01.pdf> (дата обращения: 09.11.2022).

8. Семиохин С.И. Обзор современных подходов к прогнозированию временных рядов. *Молодежный научно-технический вестник*. 2017(12):12. <http://ainsnt.ru/doc/863957.html> (дата обращения: 05.01.2023)

ВКЛАД АВТОРОВ:

Загребаяев А.М. – постановка задачи, разработка математической модели;

Попов Е.О. – программная реализация математической модели, проведение численных исследований.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Андрей Маркоянович Загребаяев, д.ф.-м.н., профессор кафедры кибернетики, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0576-3587> ; e-mail: amzagrebayev@mephi.ru

Егор Олегович Попов, студент магистратуры по направлению 09.04.04 «Программная инженерия», Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2085-8683> ; e-mail: popov.egoriy@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.01.2023

После доработки 28.05.2023

Принята к публикации 04.06.2023

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Zagrebaev A.M. – problem statement, development of a mathematical model;

Popov E.O. – software implementation of a mathematical model, conducting numerical studies.

FUNDING:

The authors state that there is no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

The authors declare that there is no conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Andrey M. Zagrebaev, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Department Cybernetics, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0576-3587> ; e-mail: amzagrebayev@mephi.ru

Egor O. Popov, Master's degree student in the field of 09.04.04 Software Engineering, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2085-8683> ; e-mail: popov.egoriy@yandex.ru

Received 26.01.2023

Revision 28.05.2023

Accepted 04.06.2023