

Метод измерения расхода теплоносителя в системах контроля работы ядерных реакторов

Роман Вадимович Давыдов¹, Ирэна Михайловна Гуреева², Вадим Владимирович Давыдов³✉

^{1, 2, 3} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

³ Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии, Большие Вязёмы, Московская область, Россия, davydov_vadim66@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-1958-4221>

¹ davydovroman@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0001-8353-6553>

² irena-gureeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9530-4805>

Аннотация. Рассмотрена проблема обеспечения погрешности не более 1% при контроле расхода теплоносителя, протекающего в трубопроводе первого контура реактора атомных электростанций. Предложен метод измерения расхода теплоносителя на основе регистрации γ -излучения в процессе изменения кислородной активности теплоносителя. Создана измерительная конструкция для регистрации всплесков γ -излучения, содержащая датчики на основе оптического волокна, и описаны способы её размещения на трубопроводе. Для реализации предложенного метода разработан оптический расходомер для контроля расхода теплоносителя в трубопроводе при ламинарном и турбулентном режимах течения и различной температуре. Установлено оптимальное значение легирования сердцевины оптического волокна оксидом германия для измерений расхода теплоносителя при различной интенсивности кислородной активности. Предложен способ восстановления прозрачности оптического волокна при измерениях расхода теплоносителя под действием γ -излучения. Подробно рассмотрена методика измерения расхода теплоносителя и отмечены особенности её реализации. Представлены результаты исследования оптического расходомера на экспериментальном стенде.

Ключевые слова: оптический расходомер, теплоноситель, система контроля, ядерный реактор, кислородная активность, γ -излучение, лазерное излучение, оптическое волокно, расход, погрешность измерения

Для цитирования: Давыдов Р. В., Гуреева И. М., Давыдов В. В. Метод измерения расхода теплоносителя в системах контроля работы ядерных реакторов // Измерительная техника. 2021. № 11. С. 30–37. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-11-30-37>

Method of coolant expenditure measuring in work control system of nuclear reactor

Roman V. Davydov¹, Irena M. Gureeva², Vadim V. Davydov³✉

^{1, 2, 3} Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

³ All Russian Research Institute of Phytopathology, B. Vyazemy, Moscow Region, Russia, davydov_vadim66@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-1958-4221>

¹ davydovroman@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0001-8353-6553>

² irena-gureeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9530-4805>

Abstract. The article discusses a design of an optical flow meter for monitoring the flow rate of a coolant in a pipeline, both in laminar and turbulent flow regimes at different temperatures. A method for measuring the flow rate of the coolant based on the registration of γ -radiation from changes in its oxygen activity has been developed. The design of sensors for recording oxygen activity based on optical fiber and a method for their placement on the pipeline are proposed. The optimal value of doping the core of an optical fiber with germanium oxide for measuring the flow rate of the coolant q at various intensities of oxygen activity in it has been established. A method is proposed for restoring the transparency of an optical fiber when measuring q in the presence of γ -radiation. The technique for measuring q is considered in detail and the features of its implementation are noted. The results of investigating the operation of an optical flow meter on an experimental stand are presented.

Keywords: optical flowmeter, coolant, control system, nuclear reactor, oxygen activity, γ -radiation, laser radiation, optical fiber, expenditure, measurement error

Введение. Развитие промышленности, увеличение населения и многое другое постоянно требует для решения различных задач всё больше и больше электрической энергии. Атомные электростанции (АЭС) являются одним

из основных источников энергии необходимой мощности для различных отраслей промышленности, при оказании услуг населению и другим потребителям в любое время суток [1–3]. Традиционные источники электрической энергии

(гидро-, теплоэлектростанции) или исчерпали большинство возможностей по увеличению мощностей, или очень сильно зависят от цен на топливо (уголь, газ, продукты переработки нефти) и стабильности его поставок. Запасы топлива на Земле сокращаются, а применение возобновляемых источников энергии в силу различных причин [4] не гарантирует поставки электрической энергии большой мощности в любое время суток для функционирования всех систем в крупных городах и на промышленных предприятиях [5]. Поэтому, несмотря на высокую степень опасности при работе АЭС, атомная энергетика бурно развивается (разрабатываются и вводятся в эксплуатацию новые модели ядерных реакторов, модернизируется оборудование АЭС и пр.). Повышаются требования к системам безопасности эксплуатации АЭС. Для практической реализации указанных требований необходимо разрабатывать новые методы измерения и приборы, а также модернизировать действующие системы контроля на работающих АЭС.

Одной из наиболее сложных задач при эксплуатации АЭС является контроль с погрешностью не более 1 % расхода q теплоносителя, протекающего в трубопроводе в первом контуре реактора [1, 6–8]. В реакторах нового поколения ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200, введённых в эксплуатацию на ряде АЭС (Воронежской, Калининской и др.) или в перспективных проектах, например Брест-300, или в реакторах с теплоносителем на основе солевого расплава [9, 10] от значения q зависит коэффициент теплопередачи k (критерий Нуссельта) во втором контуре реактора, отвод тепла от стержней реактора и много других параметров. Поэтому обеспечение значения q в заданном диапазоне изменения является одной из важных задач при эксплуатации АЭС, а также ядерных реакторов на морских подвижных объектах.

В работах [3, 6–8, 11–13] подробно рассмотрены проблемы, которые возникают при измерениях расхода различных теплоносителей механическими и электромагнитными расходомерами. Эти проблемы связаны с высокой химической активностью, температурой и скоростью протекания теплоносителя (например, в реакторе Брест-300 максимальная температура теплоносителя 650 °С, расход $q \approx 0,08 \text{ м}^3/\text{с}$). Поэтому разработки расходомеров, работающих на других физических принципах, являются актуальными. Особое место среди них занимают приборы, в которых полностью исключён контакт измерительных элементов с потоком теплоносителя – ядерно-магнитные, магнитные и оптические расходомеры [3, 6–8, 11, 12, 14]. На АЭС с реакторами ВВЭР-1000, ВВЭР-1200, а также с реакторами, теплоноситель которых основан на солевом расплаве, возникают проблемы с применением ядерно-магнитных и магнитных расходомеров по причине большого (вместе с термоизоляцией более 1 м) внешнего диаметра трубопровода. В таком объёме сложно реализовать однородное магнитное поле для регистрации сигналов ядерного магнитного резонанса от текущей среды с высоким отношением сигнал/шум в диапазоне изменения расхода минимум на порядок значений (минимальный диапазон измерения расходомера).

Цель настоящей работы – разработка оптического расходомера, реализующего метод измерения расхода теплоносителя

в трубопроводе различного диаметра в первом контуре реактора АЭС. Метод основан на регистрации γ -излучения в процессе изменения кислородной активности теплоносителя.

Метод измерения расхода теплоносителя с использованием γ -излучения. Проведённые различными учёными исследования показали, что под действием γ -излучения оптическое волокно темнеет – увеличиваются радиационно-наведённые потери [15, 16]. Для измерения коэффициента радиационно-наведённых потерь α_s используется классическая формула [15–17]:

$$\alpha_s = -10 \lg(P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}})l^{-1}, \quad (1)$$

где $P_{\text{вых}}$, $P_{\text{вх}}$ – мощности лазерного излучения соответственно на выходе из оптического волокна и входе в него; l – длина оптического волокна.

Эффект увеличения коэффициента потерь α_s основан на образовании электронно-дырочных пар. Электрон занимает место кислорода в циклической пространственной структуре. Свободные носители заряда имеют высокую подвижность. Если экспозиционная доза облучения невысока, то число образовавшихся E' -центров (образований в кристаллической структуре сердцевинки оптического волокна, на которых происходит рассеяние лазерного излучения) невелико, и волокно темнеет слабо, т. е. достаточно долго сохраняется основное оптическое свойство волокна – прозрачность. С увеличением дозы облучения увеличиваются число образующихся E' -центров и скорость потемнения волокна. На рис. 1 представлены зависимости мощности лазерного излучения $P_{\text{вых}}$ на выходе из оптического волокна от времени t при воздействии γ -излучения (импульс длительностью 2 с,

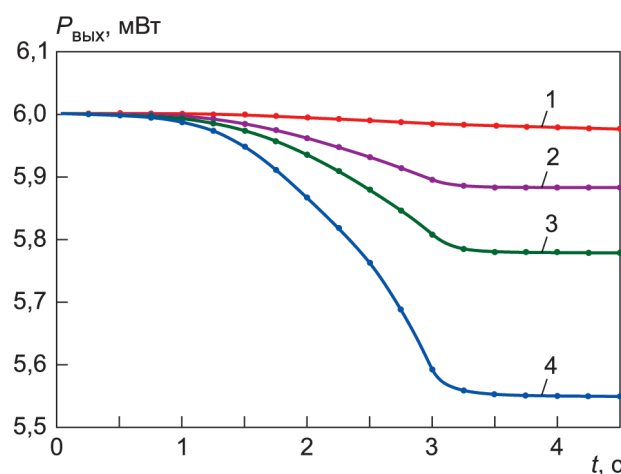


Рис. 1. Временные зависимости выходной мощности $P_{\text{вых}}$ лазерного излучения оптического модуля с длиной волны 1550 нм при $T = 294,2 \text{ К}$ для одномодового оптического волокна с сердцевинами из чистого кварца SiO_2 (1) и сплава $\text{SiO}_2\text{--GeO}_2$ при легировании 1,5; 4,0 и 15,0 % (2–4 соответственно)

Fig. 1. The dependence of the change in the laser radiation power P_{out} on time t at a wavelength of $\lambda = 1550 \text{ nm}$ for a single-mode fiber at $T = 294,2 \text{ K}$. Graphs 1–4 correspond to different types of optical fiber core: pure silica SiO_2 ; $\text{SiO}_2\text{--GeO}_2$ (alloying 1.5 %); $\text{SiO}_2\text{--GeO}_2$ (alloying 4 %), $\text{SiO}_2\text{--GeO}_2$ (alloying 15 %)

экспозиционная доза облучения 100 Гр) для волокна с различными типами сердцевин. В соответствии с рис. 1 волокно с сердцевиной из чистого кварца менее чувствительно к воздействию γ -излучения. С увеличением степени легирования сердцевин оптического волокна увеличиваются потери α_s и крутизна их нарастания.

После прекращения действия γ -излучения структура волокна со временем восстанавливается. Время, за которое происходит уменьшение концентрации E' -центров в e раз, является временем релаксации. Процессы восстановления прозрачности после воздействия γ -излучения в оптическом волокне протекают крайне медленно и длительность полного восстановления оптических свойств волокна может быть более 10^7 с.

Согласно исследованиям использование дополнительно лазерного излучения может существенно ускорить процесс релаксации E' -центров в оптическом волокне [17, 18]. На рис. 2 показан процесс управления релаксационными процессами E' -центров в оптическом волокне после прекращения мощного импульсного γ -излучения при сохранении радиоактивного фона. Полученные в настоящей работе результаты подтвердили предположение, о том, что с увеличением степени легирования оптического волокна увеличивается скорость релаксации E' -центров под действием вынужденного лазерного излучения. Поэтому в разработанной конструкции оптического расходомера применены специально изготовленные волокна с сердцевиной из материала $\text{SiO}_2\text{--GeO}_2$ (легирование оксидом германия 15 % или более) и реализован метод управления коэффициентом потерь α_s [17, 18].

Одной из особенностей работы указанных выше моделей ядерных реакторов является кислородная активность

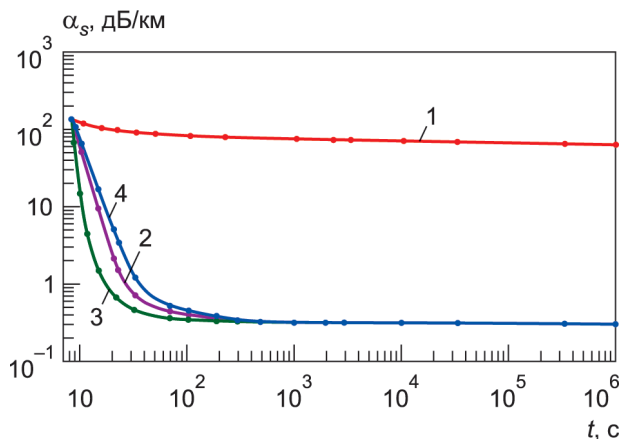


Рис. 2. Временные зависимости коэффициента радиационно-наведённых потерь α_s в одномодовом оптическом волокне с сердцевиной из сплава $\text{SiO}_2\text{--GeO}_2$ (легирование 1,5 %) на длине волны $\lambda_n=1550$ нм при $T=294,2$ К и различной мощности лазерного излучения с длиной волны $\lambda_n=1310$ нм: импульсное излучение мощностью 0; 200; 400 мВт – 1–3 соответственно; постоянное излучение мощностью 100 мВт – 4

Fig. 2. The dependence of the change in losses α_s on time t at a wavelength $\lambda=1550$ nm for a single-mode fiber core $\text{SiO}_2\text{--GeO}_2$ (doping 1.5 %) at $T=294.2$ K. Graphs 1–3 correspond to different power of pulsed laser radiation with $\lambda=1310$ nm in mW: 0; 200; 400. Graph 4 – constant level of laser radiation with a power of 100 mW

$^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$ теплоносителя, протекающего в трубопроводе первого контура реактора. Кислородная активность повышается только при работе реактора на высоких энергетических уровнях мощности и снижается практически сразу после прекращения цепной реакции. Специалисты по эксплуатации ядерных реакторов знают об этой активности [9, 13, 19], но не контролируют её (поскольку не применяют это знание на практике), а контролируют только содержание изотопов ^{131}I , характеризующее отравление зоны реактора ксеноном.

При протекании по трубопроводу теплоносителя с кислородной активностью к естественному фону радиоактивного излучения добавляются дополнительные γ -кванты, обусловленные распадом ядер ^{16}N . Данная добавка к экспозиционной дозе облучения, действующей на оптическое волокно, носит импульсный характер и появляется в определённой зоне трубопровода. Это связано с неравномерностью распределения в теплоносителе нейтронов с энергией более 9 МэВ, которые при взаимодействии с ядрами кислорода, входящими в состав теплоносителя, образуют ядра ^{16}N в результате реакции (n, p) . Максимальный временной интервал между появлениями всплесков γ -излучения в этой зоне трубопровода составляет менее 200 с. Одна часть этих всплесков имеет малую экспозиционную дозу облучения, поэтому их невозможно зарегистрировать на установившемся радиационном фоне с использованием оптического волокна, несмотря на то, что оптическое волокно находится под действием высокой температуры T и в нём очень высокая скорость образования и разрушения E' -центров. Другая часть всплесков γ -квантов в области размещения катушек оптического волокна будет резко увеличивать количество E' -центров, при этом потери α_s увеличиваются, мощность $P_{\text{вых}}$ уменьшается. Если на трубопроводе расположить катушку с оптическим волокном, то увеличится площадь воздействия γ -квантов, а мощность $P_{\text{вых}}$ более резко уменьшится. Если на трубопроводе на расстоянии L друг от друга по течению теплоносителя разместить две разделённые защитными экранами катушки с оптическим волокном, то выходная мощность во второй катушке начнёт уменьшаться через некоторое время Δt . Время Δt соответствует времени протекания сегмента теплоносителя с кислородной активностью по трубопроводу от первой катушки до второй. При одинаковом граничном значении спада $P_{\text{вых}}$ и одним источнике лазерного излучения с одинаковой мощностью для обеих катушек можно с помощью схем сравнения определить Δt . С учётом времени Δt можно найти расход теплоносителя по формуле

$$q = \frac{\pi d^2}{4} \frac{L}{\Delta t}, \quad (2)$$

где d – внутренний диаметр трубопровода.

После измерения Δt потери α_s восстанавливают до первоначального значения (до появления в зоне катушек всплесков γ -излучения с высокой экспозиционной дозой облучения от протекающего теплоносителя) методом управления скоростью релаксации E' -центров в оптическом волокне [17, 18]. Затем можно опять измерять q (если не будут

восстановлены оптические свойства волокна, то измерять q невозможно).

Конструкция оптического расходомера и особенности измерений расхода теплоносителя. Для реализации предложенного метода измерения q теплоносителя на основе регистрации γ -излучения разработан оптический расходомер (рис. 3). При создании расходомера учтены результаты анализа конструкций приборов и систем для измерений расходов жидких металлов и расплавов при высоких температурах [3, 6–8, 11–14, 20–22]. Теплоноситель протекает по трубопроводу 1. Данные трубопроводы для ядерных реакторов изготавливают из сплава углеродной стали со специальными добавками. Процесс коррозии внутри такого трубопровода начинается не ранее чем через 20–25 лет (и даже позднее) при сроке эксплуатации реактора 50–60 лет. Поэтому погрешность измерения расхода на протяжении более половины цикла эксплуатации реактора не будет зависеть от коррозии внутри трубопровода.

Катушки 2, 3 с оптическим волокном размещены поверх слоя теплоизоляции трубопровода, что позволяет полностью исключить контакт измерительных элементов (оптическое волокно) расходомера с теплоносителем и стенками трубопровода, а также обеспечить эксплуатацию оптического волокна при температуре порядка 300–350 °С или ниже. Таких оптических волокон в настоящее время выпускается очень много. Максимальная температура эксплуатации современного оптического волокна, при которой сохраняются его функциональные возможности составляет порядка 850 °С. Поэтому температурная деградация оптического волокна будет медленной, одинаковой для обеих катушек и существенно не повлияет на результаты измерения Δt .

Предложенная схема размещения катушек предусматривает два возможных варианта – расстояние L фиксируется или может варьироваться, для этого необходимо использовать полимерные каркасы, устойчивые к высоким температурам, которые легко перемещаются вдоль трубопровода поверх слоя термоизоляции. Это позволяет расширить возможности расходомера при измерении q . Изменение расстояния L крайне сложно и не всегда целесообразно при эксплуатации АЭС, но крайне важно при исследовании режимов работы экспериментальной модели реактора, так как в ряде случаев расход теплоносителя необходимо варьировать в большом диапазоне.

От передающего оптического модуля 20 непрерывное излучение (длина волны $\lambda_n = 1550$ нм, регулируемая мощность излучения 0,1–10 мВт) через оптический делитель 9 ($N=2$) поступает на входы мультиплексоров 10, 11. На другие входы этих мультиплексоров в определённые моменты времени подаётся импульсное лазерное излучение (длина волны $\lambda_n = 1310$ нм, регулируемая мощность излучения 10–500 мВт) полупроводникового лазера 15 с импульсным драйвером питания 16. Выходы мультиплексоров 10, 11 подключены к катушкам оптического волокна 2, 3 соответственно, откуда лазерные лучи с длинами волн λ_n , λ_n поступают на выходы мультиплексоров 7, 6. Входы этих мультиплексоров подключены соответственно к входам измерителей мощности

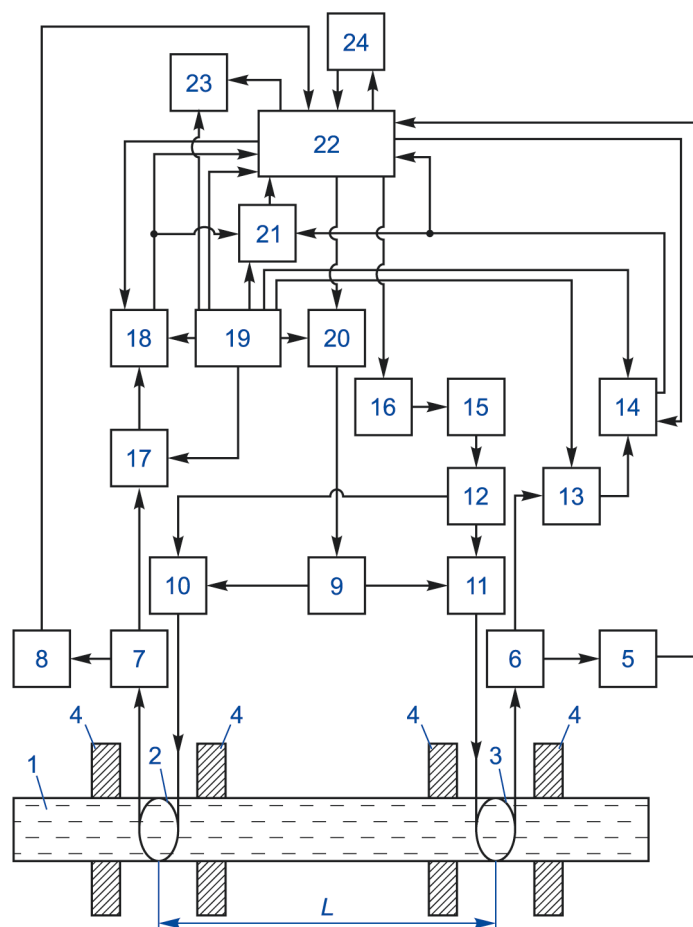


Рис. 3. Структурная схема лабораторного макета оптического расходомера:

1 – трубопровод с теплоносителем; 2, 3 – катушки с оптическим волокном (датчики); 4 – защитные радиационные экраны; 5, 8 – измерители оптической мощности; 6, 7, 10, 11 – мультиплексоры; 9, 12 – оптические делители $N:2$; 13, 17 – фотоприёмники; 14, 18 – компараторы; 15 – полупроводниковый лазер; 16 – импульсный драйвер питания; 19 – многофункциональный драйвер питания; 20 – передающий оптический модуль; 21 – логическое устройство; 22 – устройство обработки и управления; 23 – устройство индикации; 24 – центральный компьютер

Fig. 3. Block diagram of a laboratory model of an optical flow meter:
1 – pipeline with a coolant; 2, 3 – spools with optical fiber (sensors); 4 – protective radiation shields; 5, 8 – optical power meters; 6, 7, 10, 11 – multiplexers; 9, 12 – optical dividers $N:2$; 13, 17 – photodetectors; 14, 18 – comparators; 15 – semiconductor laser; 16 – pulse power driver; 19 – multifunctional power driver; 20 – transmitting optical module; 21 – logical device; 22 – processing and control device; 23 – display device; 24 – central computer

8, 5 и фотоприёмников 17, 13. На измерители мощности поступает лазерное излучение с длиной волны λ_n , на фотоприёмники – с длиной волны λ_n . Измерители мощности необходимы для контроля состояния оптического волокна (определения коэффициента радиационно-наведённых потерь α_s) с использованием выражения (1). В разработанной конструкции расходомера значение l – это расстояния между выходами мультиплексоров 10 или 11 и 7 или 6. В дальнейшем по значению α_s контролируют достоверность результатов

измерений расхода q . Значения напряжений фотоприёмников 17 ($U_{\phi 1}$), 13 ($U_{\phi 2}$), содержащие информацию о мощности лазерного излучения с длиной волны λ_n , поступают на входы компараторов 18, 14 соответственно. На других входах компараторов установлен уровень напряжения U_k , по достижению которого происходит срабатывание и вместо нуля формируется логическая единица. На рис. 4 представлены временные зависимости изменения выходного напряжения фотоприёмников.

В зоне размещения катушек с оптическим волокном всегда присутствует γ -излучение. Регулируя мощность лазерного излучения оптического модуля, в оптическом волокне можно достигать баланса между образовавшимися новыми и исчезнувшими в процессе релаксации E -центрами [17, 18]. Поскольку температура оптического волокна нестабильна, то в режиме баланса двух процессов значение α_s всё

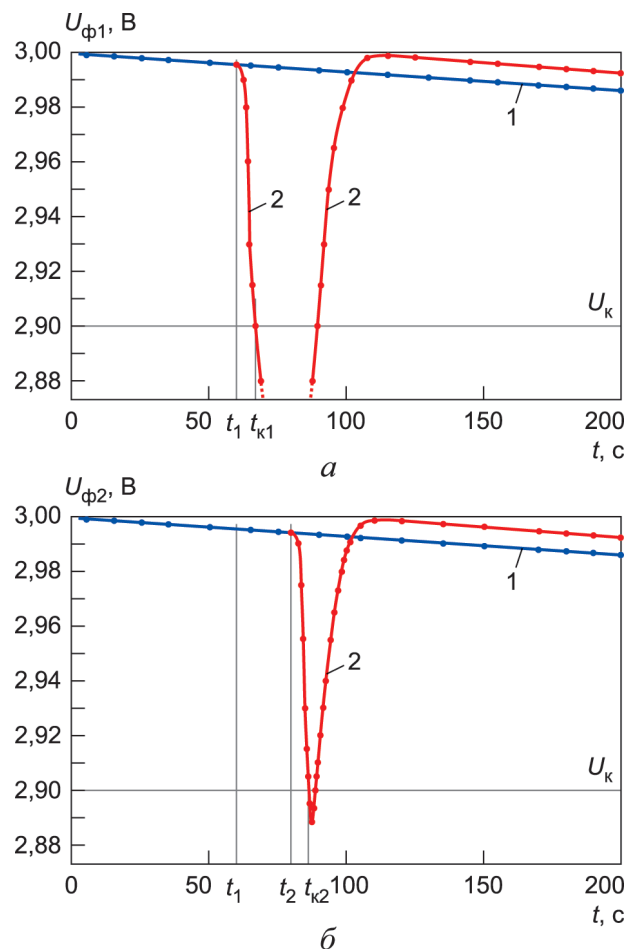


Рис. 4. Временные зависимости напряжений $U_{\phi 1}$, $U_{\phi 2}$ фотоприёмников 17 (а), 12 (б) при отсутствии в трубопроводе теплоносителя с кислородной активностью (1) и при прохождении через трубопровод с размещённой на нём катушкой с оптическим волокном теплоносителя с кислородной активностью (всплеск γ -квантов) (2)

Fig. 4. The dependence of voltage change $U_{\phi 1}$, $U_{\phi 2}$ on time t on photodetectors 17 (a), 12 (b). Graph 1 corresponds to the case when there is no coolant with oxygen activity in the pipeline. Graph 2 – the passage through the zone of the pipeline, on which the coil with the optical fiber is located, of the coolant with oxygen activity (burst of γ -quanta)

равно будет увеличиваться, но очень медленно (см. рис. 4, кривые 1). Под воздействием на волокно только фонового радиоактивного излучения и слабых всплесков γ -квантов напряжения $U_{\phi 1}$, $U_{\phi 2}$ уменьшаются медленно и за время $t=200$ с не достигают значения U_k (см. рис. 4). Поэтому на выходе компараторов значение напряжения не изменяется и соответствует нулю. На входы исключающего ИЛИ, входящего в состав логического устройства 21, с выходов компараторов поступают нули. На выходе устройства 21 формируется ноль, который поступает на устройство управления и обработки 22. В момент времени t_1 (появление большого числа γ -квантов от распада ядер ^{16}N в зоне катушки 2, см. рис. 3) коэффициент потерь α_s резко возрастает, напряжение $U_{\phi 1}$ уменьшается и через некоторое время достигает U_k на втором входе компаратора 18. Компаратор срабатывает, и на его выходе появляется логическая единица, которая поступает на один из входов устройства исключающего ИЛИ. На выходе устройства 21 формируется сигнал, соответствующий единице. Через некоторое время Δt данный процесс происходит во втором плече оптического расходомера (см. рис. 3, катушка 3). После того, как на второй вход устройства исключающего ИЛИ с выхода компаратора 14 поступает сигнал, соответствующий логической единице, на выходе исключающего ИЛИ формируется сигнал, соответствующий логическому нулю. В итоге на выходе устройства 21 формируется прямоугольный импульс длительностью $\Delta t = t_{k1} - t_{k2}$, которая соответствует времени протекания сегмента теплоносителя с кислородной активностью по трубопроводу на расстояние L (см. рис. 1). Эта информация поступает в устройство обработки и управления 22, где по формуле (2) определяется значение q . Кроме того, с помощью данного устройства регулируют мощности лазерного излучения оптического модуля и полупроводникового лазера, а также уровень напряжений U_k компараторов. Это регулирование необходимо, так как в процессе эксплуатации в зоне радиоактивного воздействия γ -излучения оптическое волокно медленно деградирует, как и все оптические элементы. Информация о расходе q в требуемых единицах измерения (например, в литрах в секунду) поступает в устройство индикации 23 для визуального контроля и передаётся в центральный компьютер 24 АЭС или подвижного объекта.

После поступления в устройство 22 прямоугольного импульса в нём формируется команда запуска импульсного драйвера питания 16, и излучение полупроводникового лазера с длиной волны λ_n поступает через делитель 12 на входы мультиплексоров 10, 11, а далее в оптическое волокно. Это излучение разрушает образовавшиеся под действием γ -излучения E -центры (релаксация ускоряется). Релаксация становится намного быстрее образования новых E -центров, даже в присутствии новой кислородной активности в зоне катушки с оптическим волокном. Мощность лазерного излучения с длиной волны λ_n , прошедшего через оптическое волокно катушек 2, 3, измеряется оптическими измерителями 8, 5, поступает в устройство 22, где по формуле (1) определяется значение α_s . При достижении коэффициентом потерь α_s заранее установленного значения,

соответствующего состоянию оптического волокна до появления мощных всплесков γ -квантов в зоне его размещения, импульсный драйвер питания отключается.

Во время восстановления свойств (прозрачности оптического волокна) полупроводниковый лазер с длиной волны λ_n работает в непрерывном режиме. В определённый момент времени напряжение фотоприёмников, которое поступает на первые входы компараторов, будет больше опорного напряжения на двух вторых входах компараторов. Компараторы вернутся в исходное состояние (на выходе компаратора уровень напряжения будет соответствовать нулю). Это изменение на компараторах произойдёт одновременно, так как процесс восстановления свойств оптического волокна в двух катушках идентичен. После этого разработанный оптический расходомер готов к следующему измерению расхода q .

Время появления кислородной активности в зоне размещения катушек с оптическим волокном точно установить невозможно, поэтому в работе прибора есть ряд особенностей. В основном эти особенности связаны с тем, что в момент восстановления свойств оптического волокна сегмент теплоносителя с кислородной активностью находится в зоне катушки оптического волокна или между двумя катушками по направлению потока теплоносителя в трубопроводе. Авторами настоящей статьи установлены три случая, которые могут возникнуть при измерениях q и повлиять на достоверность их результатов. В работе предложенного оптического расходомера возникновение этих случаев учтено.

Первый случай – сегмент теплоносителя с мощным всплеском γ -квантов находится в момент восстановления оптического волокна в зоне катушки 3 (см. рис. 3). Информация от измерителя мощности 5 позволяет восстановить оптическое волокно в катушке после выхода из её зоны сегмента теплоносителя с кислородной активностью. Пока на двух измерителях мощности её значения не будут одинаковыми, импульсный драйвер питания не выключается – это учтено в работе расходомера.

Второй случай – сегмент теплоносителя в момент окончания восстановления свойств оптического волокна находится между катушками 2, 3. В этом случае логическая единица поступит в устройство 21 только с выхода компаратора 14 и результат измерения расхода будет недостоверным. Для исключения этого сигналы с выходов компараторов также поступают в устройство 22, в котором установлен счётчик и определитель последовательности прихода логических единиц с входов компараторов. Если с выхода второго компаратора логическая единица пришла раньше, чем изменился ноль на логическую единицу на выходе первого компаратора, включается импульсный драйвер питания, который восстанавливает оптические свойства волокна в двух катушках и переводит компараторы в состояние логического нуля на выходах. Прибор готов к измерению расхода. Необходимо отметить, что в таком режиме работы прямоугольный импульс в устройстве 21 на выходе исключаяющего устройства ИЛИ не сформировался, расход не измерялся, ошибки при работе прибора не произошло.

Третий случай – сегмент теплоносителя в момент восстановления свойств оптического волокна оказался в зоне первой катушки с оптическим волокном. Пока мощные всплески γ -квантов оказывают воздействие на волокно в первой катушке, коэффициент потерь α_s не восстановлен до исходного значения, импульсный драйвер питания включён, логическая единица на выходе компаратора 18 не формируется. В момент прекращения этого воздействия (сегмент теплоносителя с кислородной активностью оказался между двумя катушками в промежутке между экранами) оптические свойства волокна в первой катушке быстро восстанавливаются, на выходе компаратора формируется ноль, прибор готов к работе. Далее режим работы расходомера соответствует второму случаю.

В итоге измерения расхода q будут проводиться только в случае, когда мощные всплески γ -квантов, находящиеся в сегменте теплоносителя с кислородной активностью, поступают в зону первой катушки, а потом в зону второй катушки (потери в оптическом волокне двух катушек до момента поступления в их зону данного сегмента теплоносителя соответствуют первоначальному уровню).

Разработанный расходомер (лабораторный макет прибора) с катушками диаметром более 1 м апробирован с использованием двух источников рентгеновского излучения, которые ранее применялись для исследований оптического волокна в [17, 18]. Данные источники поочерёдно включали через определённые промежутки времени. Эти включения имитировали протекание по трубопроводу через зону катушек теплоносителя с кислородной активностью. Измеренные временные интервалы включения источников рентгеновского излучения сравнивали со значениями Δt , полученными с помощью разработанного оптического расходомера. Использовались временные интервалы, соответствующие 2; 4,5; 6 и 10 с, т. е. временам протекания теплоносителя между двумя катушками, размещёнными на расстоянии $L=5$ м. Различия между значениями измеренных временных интервалов составили менее 1 %, что подтверждает адекватность предложенного метода измерения расхода теплоносителя. При увеличении расстояния L до 10 м расхождения результатов измерений временных интервалов также не превысили 1 %.

Закключение. Согласно результатам проведённого исследования разработанная конструкция оптического расходомера с реализованным методом измерения расхода теплоносителя обеспечивает погрешность измерений менее 1 % в реальном времени в широком диапазоне изменения q без ограничения на диаметр трубопровода и обязательной градуировки после каждого выключения прибора.

Единственным недостатком разработанного прибора в силу особенностей его конструкции и специфики формирования дополнительных γ -квантов в теплоносителе является неперiodичность измерений расхода. Выполненные расчёты показали, что при самом неблагоприятном сценарии формирования всплесков γ -квантов в теплоносителе с кислородной активностью временной интервал между измерениями составляет не более 540 с.

Список источников

1. Алексеев П. Н., Гагаринский А. Ю., Калугин М. А. и др. К стратегии развития ядерной энергетики в России // Атомная энергия. 2019. Т. 126. Вып. 4. С. 183–187.
2. Климов Д. А., Гулевич А. В., Каграманян В. С. и др. Вызовы и стимулы развития натриевых быстрых реакторов в современных условиях // Атомная энергия. 2018. Т. 125. Вып. 3. С. 131–135.
3. Давыдов В. В., Мязин Н. С., Кирюхин А. В. Ядерно-магнитные расходомеры-релаксометры для контроля расхода и состояния теплоносителя и питательной воды на АЭС // Атомная энергия. 2019. Т. 127. Вып. 5. С. 250–255.
4. Шпейцман В. В., Николаев В. И., Поздняков А. О., Бобыль А. В., Тимашов Р. Б., Аверкин А. И. Прочность пластин монокристаллического кремния для солнечных элементов // Журнал технической физики. 2020. Т. 90. № 1. С. 79–84.
5. Bobyl A., Malyshkin V., Dolzhenko V., Grabovets A., Chernovanov V., *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 390, no. 1, 012047. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/390/1/012047>
6. Вельт И. Д., Михайлова Ю. В. Магнитный расходомер жидких металлов // Измерительная техника. 2013. № 3. С. 24–28.
7. Looney R., Priede J., *Flow Measurement and Instrumentation*, 2019, vol. 65, pp. 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2018.11.019>
8. Вельт И. Д., Дьяконова Е. А., Михайлова Ю. В., Терехина Н. В. Магнитный расходомер для быстрых натриевых реакторов // Атомная энергия. 2017. Т. 122. Вып. 4. С. 203–209.
9. Семенихин А. В., Саунин Ю. В., Рясный С. И. Методика определения достоверности внутриреакторного контроля ВВЭР в режиме реального времени // Атомная энергия. 2018. Т. 124. Вып. 1. С. 8–13.
10. Сорокин А. П., Кузина Ю. А. Физическое моделирование гидродинамики и теплообмена в быстрых натриевых реакторах с жидкометаллическим теплоносителем // Атомная энергия. 2020. Т. 128. Вып. 5. С. 259–268.
11. Давыдов В. В., Дудкин В. И., Карсеев А. Ю. Малогабаритный ядерно-магнитный релаксометр для экспресс-контроля состояния жидких и вязких сред // Измерительная техника. 2014. № 8. С. 44–48.
12. Firth J., Ladouceur F., Brodzeli Z., Wyres M., Silvestri L., *Flow Measurement and Instrumentation*, 2016, vol. 48, pp. 15–19. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.01.006>
13. Абрамов Л. В., Бакланов А. В., Бахметьев А. М. и др. Опыт АО «ОКБМ Африкантов» в развитии методов и программ анализа надежности и вероятностного анализа безопасности ядерных установок // Атомная энергия. 2020. Т. 129. Вып. 2. С. 105–110.
14. Марусина М. Я., Базаров Б. А., Силаев А. А., Марусин Н. П., Закемовская Е. Ю., Гилев А. Г., Алексеев А. В. Магнитная система на основе постоянных магнитов для расходомера многофазных текучих сред // Измерительная техника. 2014. № 4. С. 62–65.
15. Kashaykin P. F., Tomashuk A. L., Salgansky M. Y., Guryanov A. N., Dianov E. M., *Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 121, no. 21, 213104. <https://doi.org/10.1063/1.4984601>

16. Kashaykin P. F., Tomashuk A. L., Vasiliev S. A., Zarenbin A. V., Semjonov S. L., *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2020, vol. 67, no. 10, pp. 216–2171. <https://doi.org/10.1109/TNS.2020.3019404>
17. Dmitrieva D. S., Pilipova V. M., Dudkin V. I., Davydov V. V., Rud V. Yu., *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1697, no. 1, 012145. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1697/1/012145>
18. Dmitrieva D. S., Pilipova V. M., Davydov V. V., Valiullin L. R., *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1695, no. 1, 012130. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1695/1/012130>
19. Филимонов П. Е., Семченков Ю. М., Малышев В. В. и др. Испытания ВВЭР-1200 при эксплуатации в режиме суточного графика нагрузки на 6-м энергоблоке Нововоронежской АЭС // Атомная энергия. 2020. Т. 129. Вып. 3. С. 123–129.
20. Архаров И. А., Какорин И. Д. Методика расчёта расхода криогенных двухфазных потоков в бессепарационных расходомерах на базе сужающего устройства // Измерительная техника. 2020. № 7. С. 34–42. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-7-34-42>
21. Давыдов В. В. Ядерно-магнитный спектрометр для исследования потоков жидких сред // Измерительная техника. 2016. № 11. С. 46–51.
22. Ахобадзе Г. Н. Структурные методы повышения точности измерения расхода веществ в трубопроводах // Измерительная техника. 2020. № 5. С. 30–35. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-5-30-35>

References

1. Alekseev P. N., Gagarinskii A. Y., Kalugin M. A., Fomichenko P. A., Asmolov V. G., *Atomic Energy*, 2019, vol. 126, no. 4, pp. 207–212. <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00538-w>
2. Klinov D. A., Gulevich A. V., Kagramanyan V. S., Dekusar V. M., Usanov V. I., *Atomic Energy*, 2019, vol. 125, no. 3, pp. 143–148. <https://doi.org/10.1007/s10512-018-00457-2>
3. Davydov V. V., Myazin N. S., Kiryukhin A. V., *Atomic Energy*, 2020, vol. 127, no. 5, pp. 274–279. <https://doi.org/10.1007/s10512-020-00623-5>
4. Shpeizman V. V., Nikolaev V. I., Pozdnyakov A. O., Timashov R. B., Averkina A. I., *Technical Physics*, 2020, vol. 65, no. 1, pp. 73–77. <https://doi.org/10.1134/S1063784220070191>
5. Bobyl A., Malyshkin V., Dolzhenko V., Grabovets A., Chernovanov V., *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 390, no. 1, 012047. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/390/1/012047>
6. Velt I. D., Mikhailova Yu. V., *Measurement Techniques*, 2013, vol. 56, no. 3, pp. 283–288. <https://doi.org/10.1007/s11018-013-0196-z>
7. Looney R., Priede J., *Flow Measurement and Instrumentation*, 2019, vol. 65, pp. 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2018.11.019>
8. Velt I. D., D'yakonova E. A., Mikhailova Y. V., Terekhina N. V., *Atomic Energy*, 2017, vol. 122, no. 4, pp. 243–251. <https://doi.org/10.1007/s10512-017-0262-8>
9. Semikhin A. V., Saunin Y. V., Rysanyi S. I., *Atomic Energy*, 2018, vol. 124, no. 1, pp. 8–13. <https://doi.org/10.1007/s10512-018-0367-8>

10. Sorokin A. P., Kuzina Y. A., *Atomic Energy*, 2020, vol. 128, no. 5, pp. 277–286. <https://doi.org/10.1007/s10512-020-00688-2>
11. Davydov V. V., Dudkin V. I. and Karseev A. Yu., *Measurement Techniques*, 2014, vol. 57, no. 8, pp. 912–918. <https://doi.org/10.1007/s11018-014-0559-0>
12. Firth J., Ladouceur F., Brodzeli Z., Wyres M., Silvestri L., *Flow Measurement and Instrumentation*, 2016, vol. 48, pp. 15–19. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.01.006>
13. Abramov L. V., Baklanov A. V., Bakmetiev A. M., Kiselev V. V., *Atomic Energy*, 2020, vol. 129, no. 2, pp. 103–108. <https://doi.org/10.1007/s10512-020-00611-2>
14. Marusina M. Ya., Bazarov B. A., Galaidin P. A., Silaev A. A., Marusin M. P., Zakemoskya E. Yu., Gilev A. G., Alekseev A. V., *Measurement Techniques*, 2014, vol. 57, no. 4, pp. 461–465. <https://doi.org/10.1007/s11018-014-0478-0>
15. Kashaykin P. F., Tomashuk A. L., Salgansky M. Y., Guryanov A. N., Dianov E. M., *Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 121, no. 21, 213104. <https://doi.org/10.1063/1.4984601>
16. Kashaykin P. F., Tomashuk A. L., Vasiliev S. A., Zarenbin A. V., Semjonov S. L., *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2020, vol. 67, no. 10, pp. 2162–2171. <https://doi.org/10.1109/TNS.2020.3019404>
17. Dmitrieva D. S., Pilipova V. M., Dudkin V. I., Davydov V. V., Rud V. Yu., *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1697, no. 1, 012145. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1697/1/012145>
18. Dmitrieva D. S., Pilipova V. M., Davydov V. V., Valiullin L. R., *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1695, no. 1, 012130. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1695/1/012130>
19. Filimonov P. E., Semchenkov Yu. M., Malyshev V. V., Gusev I. N., *Atomic Energy*, 2020, vol. 129, no. 3, pp. 143–148. <https://doi.org/10.1007/s10512-020-00672-2>
20. Arkharov I. A., Kakorin I. D., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 63, no. 7, pp. 549–558. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01822-z>
21. Davydov V. V., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, no. 11, pp. 1202–1209. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1116-4>
22. Akhobadze G. N., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 63, no. 5, pp. 361–367. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01796-y>

Статья поступила в редакцию 10.03.2021; одобрена после рецензирования 10.04.2021; принята к публикации 17.04.2021.
The article was submitted 10.03.2021; approved after reviewing 10.04.2021; accepted for publication 17.04.2021.