



*Российская Академия Наук*

Отделение физических наук

**С.К. Манкевич, Е.П. Орлов**

**Лазерный метод измерения  
паросодержания в водном  
теплоносителе энергетического  
ядерного реактора**

Москва 2017

УДК 66.088  
ББК 32.854  
М23

ISBN 978–5–906906–25–0

© Российская академия наук, 2017  
© С.К. Манкевич, Е.П. Орлов, 2017

# Лазерный метод измерения паросодержания в водном теплоносителе энергетического ядерного реактора

С.К. Манкевич, Е.П. Орлов

Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение Науки  
Физический институт им.П.Н.Лебедева  
Российской академии наук  
Россия, 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский просп., 53

## Laser measuring method of steam-content in water heat-carrier of nuclear power reactor

S.K. Mankevich, E.P. Orlov

**Аннотация.** Для контроля паросодержания в водном теплоносителе ядерных реакторов предложено использовать лазерный фотометрический метод и основанную на нём систему измерения. Проведен анализ возможностей метода. Показано, что он может применяться как в ВВЭР, где паросодержание мало (<5%), так и в РБМК, где оно может достигать 20% и 40%. Оценка погрешности измерения составила около 2%. Для осуществления метода можно использовать оптическое волокно и оптические элементы, разработанные и освоенные промышленностью для работы в водной среде с высокой температурой и давлением, а также в условиях высокого уровня радиации, и широко применяемые в науке и технике в видимом диапазоне длин волн фотоприемники и лазеры, чьё излучение хорошо распространяется в водной среде.

**Abstract.** The laser photometric method for measuring the steam-content in the water heat carrier of the nuclear power reaction was proposed, and the performance capabilities of the method were analyzed. It is shown that this method can be applied both in the water-moderated water-cooled power reactors where the steam-content is small (<5%), and in the high-power multi-channel reactors where the steam-content can reach 20% and 40%. The estimation of the measuring accuracy gives approximately 2%. For the implementation of this method one can use optical fibers and the elements

*developed and applied in the work in the water of high temperature and high pressure, and, what is more, under conditions of high radiation, and, at last, the widely used in science and technology (in the visible part of the spectrum) the photo detectors and lasers whose radiation penetrates well in the water.*

Важнейшей проблемой современной ядерной энергетики является повышение эффективности АЭС при одновременном повышении их безопасности. Решение этой проблемы для ВВЭР и РБМК связывается с получением непрерывной, точной и достоверной информации о параметрах водного теплоносителя. Для указанных типов реакторов одним из наиболее важных параметров является паросодержание, определяющее реактивность реактора. В ВВЭР паросодержание в первом контуре, а в РБМК в технологических каналах (ТК) и каналах системы управления защитой не должно превышать некоторую пороговую величину, сверх которой нарушается штатный режим работы реактора, снижается его безопасность и срок службы тепловыделяющих сборок. Поэтому задача мониторинга паросодержания в ядерных реакторах с водным теплоносителем является весьма актуальной.

Известные методы измерения паросодержания, основанные, например, на радиационном способе [1, 2], характеризуются сложностью проведения и недостаточной точностью. Различные косвенные методы измерения паросодержания в реакторах РБМК [3] также характеризуются низкой точностью и оперативностью.

В данной работе для измерения паросодержания предлагается фотометрический метод с использованием лазерного излучения. Отметим, что в [4–7] лазерный фотометрический метод разрабатывался с целью расширения диапазона и повышения точности измерения концентрации борной кислоты в теплоносителе ВВЭР. Цель настоящего исследования выяснить условия применимости и характеристики лазерного фотометрического метода для решения сформулированной выше задачи измерения паросодержания как в ВВЭР, так и в РБМК.

Блок-схема предлагаемой лазерной измерительной системы, реализующей данный метод, приведена на рис.1. Зондирующий лазерный импульс видимого диапазона длин волн, хорошо распространяющийся в водной среде теплоносителя, протекающего в трубопроводе 3, являющемся, например, трубопроводом первого контура ВВЭР, пароводяной коммуникации в РБМК или байпасом этих трубопроводов, с выхода лазера 1 с помощью 7, 8 и 9

поступает в 2. На обратном пути он пройдя 2, 9, 8 и отразившись от 10 поступает на фотоприёмник 11, который регистрирует и измеряет энергию импульса  $E$ , информация о которой поступает в 12, куда одновременно поступает информация об исходной величине зондирующего лазерного импульса  $E_0$ , измеренная на выходе 1 вторым фотоприёмником 13.

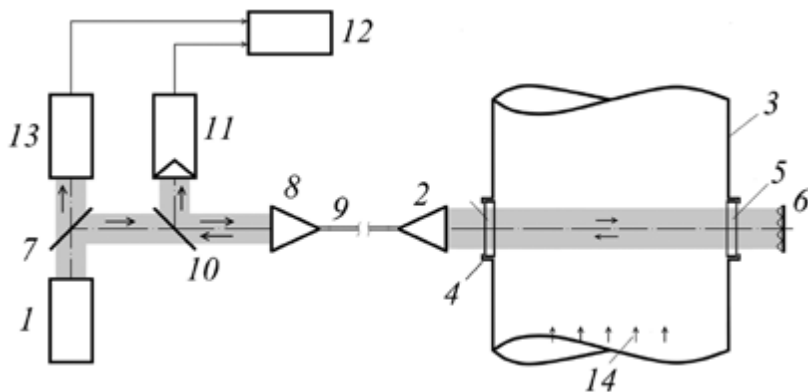


Рис.1. Блок-схема измерительной системы: 1 – лазер; 2 – расширитель лазерного пучка; 3 – трубопровод, являющийся выходным трубопроводом ТК или его байпасом; 4 и 5 – оптические иллюминаторы-окна; 6 – отражательное зеркало; 7 – полупрозрачное зеркало; 8 – адаптер волокна; 9 – волоконно-оптическая линия; 10 – второе полупрозрачное зеркало; 11 – фотоприемник; 12 – ЭВМ; 13 – второй фотоприёмник; 14 – направление движения теплоносителя.

В 12 формируется информация о величине  $E / E_0$ , характеризующей ослабление зондирующего импульса после двукратного прохождения через слой теплоносителя реактора, которое обусловлено рассеянием излучения на пузырьках пара, образующихся в процессе нагрева теплоносителя. Чем выше их концентрация, тем сильнее рассеяние и тем больше его ослабление. По величине ослабления в 12 определяется паросодержание в теплоносителе во время прохождения через него зондирующего импульса. Оптический датчик 2, 6 на рис.1 является отражательным. В некоторых зонах реактора удобнее установить оптический датчик проходного типа, в котором 6 заменено на второй выходной расширитель пучка, который принимает прошедшее через теплоноситель излучение и направляет его посредством второй волоконно-оптической линии на вход 11.

Наша задача выразить паросодержание на выходе ТК, а также в активной зоне ВВЭР, определяемое величиной, называемой сухостью пара [8] и представляющей собой массовую долю  $M''$  сухого пара в рассматриваемом объёме насыщенного пара  $x = M'' / (M' + M'')$ , где  $M'$  – масса жидкой фазы, через ослабление зондирующего излучения. Для этого обратимся к понятию объёмного [9] или как его ещё называют расходного паросодержания [10]  $\beta$ , которое выражается через сухость пара  $x$  в виде

$$\beta(x) = (\pi / 6) D_b^3 C_b = (1 + (\rho'' / \rho')(1 - x) / x)^{-1}, \quad (1)$$

где  $D_b$  – диаметр пузырька пара,  $C_b$  – их счётная концентрация;  $\rho''$  и  $\rho'$  – плотности сухого пара и воды. Зависимость  $\beta(x)$  для случая насыщенного пара в ТК РБМК-1000 показана на рис.2. При расчётах использовались значения  $\rho'' = 38,77$  и  $\rho' = 733,5$ , взятые из [15] при давлении теплоносителя на выходе ТК  $75,3 \text{ кгс/см}^2 = 73,8 \text{ бар}$  [16].

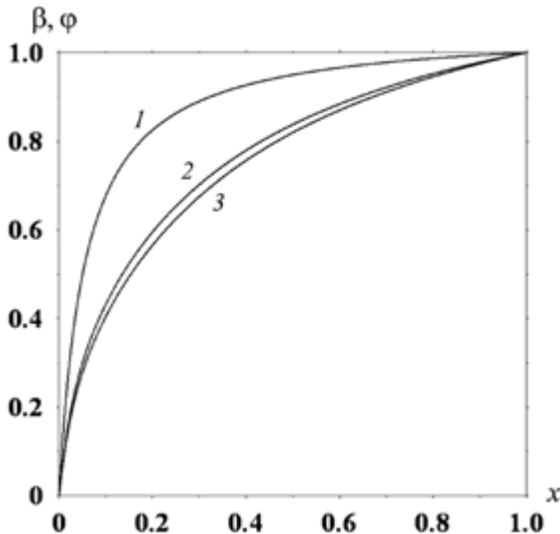


Рис. 2. Зависимости  $\beta(x)$  (1) и  $\phi(x)$  для максимальной мощности ТК (2) и мощности 50% от максимальной (3).

Для выяснения возможностей данного метода рассмотрим вначале монодисперсную пароводяную смесь. Оптическая толщина монодисперсной среды [11]

$$\tau = 1,5 \Delta n^2 \beta(x) Q l - D_b, \quad (2)$$

где  $\Delta n = n_w - n_s \approx 0,3$  – разность показателей преломления воды и водяного пара,  $Q$  – фактор эффективности ослабления зондирующего излучения,  $l$  – расстояние, проходимое зондирующим импульсом в пароводяной смеси. На рис. 1  $l$  – удвоенное расстояние между элементами 4 и 5.

Фактор  $Q$  зависит от параметра дифракции  $\alpha = \pi D_b / \lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны зондирующего излучения. При  $\alpha > 30$   $Q$  выходит на своё асимптотическое значение, равное 2 [11]. Если  $\lambda = 0,5 \times 10^{-6}$  м, то это выполняется при  $D_b \geq 5$  мкм. В ТК, например, имеются пузырьки пара диаметром от нескольких микрометров до нескольких миллиметров [10]. Следовательно, при рассеянии на пузырьках пара в (2) следует положить  $Q = 2$ . Тогда

$$\tau = 3 \Delta n^2 \beta(x) l / D_b. \quad (3)$$

Если на слой пароводяной смеси падает лазерный импульс с энергией  $E_0$ , то при  $\tau < 1$  на выходе из слоя фотоприёмником  $II$  регистрируется энергия

$$E = E_0 e^{-\tau}. \quad (4)$$

Дальнейший анализ проведём на примере ТК РБМК-1000, поскольку контроль паросодержания в нём наиболее важен. Истинное объёмное паросодержание  $\phi$  может существенно отличаться от  $\beta$  из-за уноса пузырьков восходящим потоком воды [10, 12, 13]. Тогда (3) принимает вид  $\tau = 3 \Delta n^2 \beta(x) l / D_b$ . Для расчёта  $\phi$  в ТК реактора РБМК используется формула [9, 10]

$$\phi = \left( 1 + \frac{1-x}{x} \frac{\rho''}{\rho'} K \right)^{-1}, \quad (5)$$

где  $K$  – коэффициент проскальзывания фаз (отношение истинной скорости пара к истинной скорости жидкости [10]):

$$K = 1 + 3a (1/5 + \beta^2 / 2) \quad (6)$$

$a = (1 - P / P_{cr}) / (w_0 / (gd_h))^{1/4}$ ,  $dh = 4S/\Pi$  и  $S$  – гидравлический диаметр сечения и его проходная площадь,  $\Pi$  – смоченный периметр сечения,  $g$  – ускорение свободного падения,  $w_0 = G/(\rho' S)$  – скорость циркулирующего теплоносителя,  $G$  – его массовый расход,  $P$  – давление пароводяной смеси;  $P_{cr} = 225$  кгс/см<sup>2</sup> бар – критическое давление. Зависимости  $\varphi(x)$  для максимальной мощности ТК и 50% мощности показаны на рис.2. Так же как и при расчёте  $\beta(x)$  использовались  $\rho'' = 38,77$  и  $\rho' = 733,5$ , взятые из [15] при давлении теплоносителя на выходе ТК  $75,3$  кгс/см<sup>2</sup> =  $73,8$  бар [16], его максимальный расход  $G = 7,764$  кг/с [9, 10], а также геометрические параметры ТК – диаметры ТК, твэлов и центральной трубы, соответственно,  $d_{TC} = 80$ ,  $d_{FR} = 13,6$  и  $d_{CT} = 14,5$  мм,  $4S = \pi(d_{TC}^2 - 18d_{FR}^2 - d_{CT}^2) = 8,99 \times 10^3$  мм<sup>2</sup>;  $\Pi = \pi(d_{TC} + 18d_{FR} + d_{CT}) = 1,06 \times 10^3$  мм;  $d_n = 8,4$  мм;  $w_0 = 4,71$  м/с. Видно, что штатному режиму работы ТК, при котором  $x = 0,145$  (14,5%), отвечает  $\varphi_{ST} = 0,52$ , а при мощности ТК 50%  $\varphi = 0,49$ . Максимально допустимому паросодержанию 19,6% отвечают  $\varphi = 0,59$  и  $\varphi = 0,56$ , соответственно. При этом вытекающее из [17] достаточное условие  $1,1(\varphi)^{1/3} \leq 1$  того, что рассеяние можно рассматривать, как рассеяние на независимых частицах выполняется.

Т.к.  $x$  определяется через  $\beta$  (см.(1)), то для нахождения  $x$  по ослаблению зондирующего излучения надо  $\beta$  выразить через  $\varphi$ , которое, с учётом (4) и  $\tau = 3 \Delta n^2 \varphi l / D_b$ , является экспериментально измеряемой величиной

$$\varphi = (D_b / (3 \Delta n^2 l) \ln (E_0 / E)). \quad (7)$$

Записывая (5) в виде  $\varphi = (1 + (1 - \beta)K / \beta)^{-1}$  [10] и подставляя сюда (6), получаем уравнение

$$\beta^3 - \beta^2 + 2(1/5 + (3a\varphi)^{-1})\beta - 2(1/5 + (3a)^{-1}) = 0. \quad (8)$$

Его решение  $\beta = A + B^{1/3}$  [14], где  $A = (-q/2 + \sqrt{Q})^{1/3}$ ,  $B = (-q/2 + \sqrt{Q})^{1/3}$ ,  $q = \frac{2}{9} \left( \frac{1}{a\varphi} - \frac{3}{a} - \frac{23}{15} \right)$ ,



$$Q = \frac{1}{9^2} \left( \frac{8/9}{a^3 \varphi^3} + \frac{19/15}{a^2 \varphi^2} - \left( \frac{6}{a} + \frac{76}{25} \right) \frac{1}{a\varphi} + \frac{9}{a^2} + \frac{46}{5a} + \frac{294}{125} \right)$$

Используя далее выражение  $x = (1 + (\rho' / \rho'')(1 - \beta) / \beta)^{-1}$ , полученное из (1), находим зависимость  $x(\varphi)$ . Типичные зависимости сухости пара  $x(\varphi)$  для максимальной и 50% мощности ТК показаны на рис.3.

В случае полидисперсной среды в (7) вместо  $D_b$  будет фигурировать диаметр Соттера  $D_{32}$  [11]. Определить  $D_{32}$  для конкретного типа ядерного реактора можно с помощью эталонного ТК, в котором твэлы с ядерным топливом заменены на калиброванные электронагреватели такой же мощности, что и твэлы с ядерным топливом в штатном режиме работы и для которых  $\varphi = \varphi_{ST}$  известно. Зондируя в эталонном ТК слой теплоносителя такой же толщины, что и в контролируемом и, используя  $\varphi_{ST}$  находим  $D_{32} = 3\Delta n^2 l \varphi_{ST} / \ln(E_0 / E_{ST})$ . Подставляя в (7), получаем

$$\varphi = \varphi_{ST} \ln(E_0 / E) / \ln(E_0 / E_{ST}) \quad (9)$$

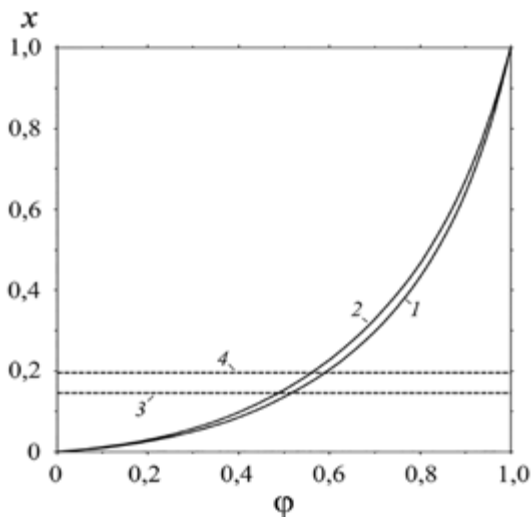


Рис. 3. Зависимость сухости пара  $x$  от истинного паросодержания  $\varphi$  для максимальной мощности ТК (1) и для 50% мощности (2). Штриховая горизонтальная прямая (3) отвечает сухости пара  $x = 14,5\%$ , а (4) – максимально допустимой сухости  $x = 19,6\%$ .

Таким образом, по данной, полученной в результате проведенного анализа, формуле, по измеренным величинам ослабления зондирующего лазерного излучения  $E / E_0$  и  $E_{ST} / E_0$  можно вычислить величину истинного паросодержания  $\varphi$ , а по ней получить значение основной измеряемой величины  $x$  на основании зависимости  $x(\varphi)$ , полученной выше.

Условие однократного рассеяния  $\tau \ll 1$  реализуется тогда, когда толщина пароводяного слоя  $l \sim D_{32}$ . В случае нарушения этого условия (4) следует записать в виде  $E = E_0 \exp(-f(\tau))$ , где  $f(\tau)$  – функция, учитывающая многократность рассеяния. С учётом многократности (9) принимает вид  $\varphi = \varphi_{ST} f^{(-1)}(\ln(E_0 / E)) / f^{(-1)}(\ln(E_0 / E_{ST}))$ , где  $f^{(-1)}$  – функция обратная  $f$ .

Хотя условие  $\tau \ll 1$  в общем случае может нарушаться, для оценки энергии лазерных импульсов, требуемой для просвечивания слоя теплоносителя заданной толщины, примем всё же приближение однократного рассеяния. Используя (7), (5), (6) и (1) получаем

$$E_0 = S_\mu \exp \left\{ \frac{3\Delta n^2 l}{D_{32}} \left[ 1 + \frac{1-x}{x} \frac{\rho''}{\rho'} \left[ 1 + 3a \left( \frac{1}{5} + \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1-x}{x} \frac{\rho''}{\rho'} \right)^{-2} \right) \right] \right]^{-1} \right\}, \quad (10)$$

где  $S_\mu$  – чувствительность фотоприёмника при отношении сигнал/шум, равно  $\mu$ . Заметим, что в экспериментах, моделирующих процесс парообразования в ТК с помощью воздушноводяной смеси, диаметр пузырьков воздуха составлял от 2 до 15 мм [10], а в пароводяном потоке, как отмечалось выше, имеются пузырьки с  $D_b$  от нескольких микрометров до нескольких миллиметров. Поэтому возьмём  $1 \leq D_{32} \leq 10$  мм (при кипении воды при атмосферном давлении пузырьки примерно именно такие). Далее, положим для фотоприёмника излучения с  $\lambda = 0,5$  мкм  $\mu = 10$ , квантовый выход 0,25 и, следовательно,  $S_\mu \approx 3 \times 10^{-17}$  Дж [18],  $x \approx 0,2$ . Зависимости  $E_0$  от толщины пароводяного слоя  $l$  при значениях диаметра Соттера от 1 до 10 мм показаны на рис. 4.

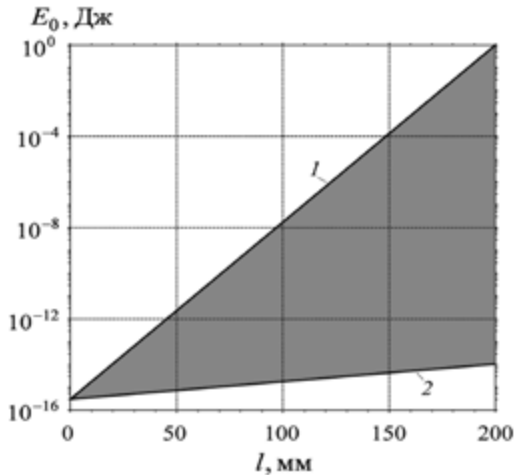


Рис. 4. Зависимости  $E_0(l)$  при сухости пара  $x = 0,2$  и диаметре Соттера от 1 ( $l$ ) до 10 ( $2$ ) мм.

Каков диаметр Соттера в технологическом канале РБМК при давлении насыщенного пара  $75 \text{ кг/см}^2$  или в ВВЭР при давлении  $160 \text{ кг/см}^2$  неизвестно. Неизвестна также функция распределения пузырьков пара по диаметрам. Но при заменах отработавших тепловыделяющих сборок во вновь устанавливаемые в технологические каналы тепловыделяющие сборки можно монтировать лазерные датчики с разной длиной  $l$ , рассчитанные на разные диаметры Соттера, и тогда появится информация не только о его величине, но и о функции распределения пузырьков по диаметрам, и возможно о функции  $f$ .

Обратим внимание на то, что для контроля отклонения паросодержания от нормы не обязательно проводить точные измерения паросодержания, т.к. это более общая задача, интересная с точки зрения физики процесса парообразования. Поэтому для контроля паросодержания не обязательно знать функцию  $f$ . Достаточно сравнивать данные по рассеянию в технологических каналах с данными по рассеянию в эталонном канале, в качестве которого может быть использован один из 1693 технологических каналов.

Погрешность определения  $x$  оценим, используя найденную функцию  $x = x(\varphi)$ , которая при  $x = 0,145$  и  $\varphi = 0,52$  даёт связь  $\delta x / x = 2,18 \delta \varphi / \varphi$ , где

$$\frac{\delta\varphi}{\varphi} = \frac{\delta\varphi_{st}}{\varphi_{st}} + \frac{1}{\ln(E_0/E)} \frac{\delta(E_0/E)}{E_0/E} + \frac{1}{\ln(E_0/E_{st})} \frac{\delta(E_0/E_{st})}{E_0/E_{st}}.$$

Т.к. типичная погрешность измерения отношения энергии двух импульсов одним и тем же фотоприёмником  $\sim 1\%$ , а  $\ln(E_0/E)$  и  $\ln(E_0/E_{st})$  больше единицы, то  $\delta x/x$  определяется, главным образом, относительной погрешностью измерения отношений  $E_0/E$ ,  $E_0/E_{st}$  и составляет около  $2\%$ .

В ВВЭР, в первом контуре и в активной зоне, паросодержание должно быть близко к нулю и важна чувствительность метода. Для её оценки учтём, что при малом  $\varphi$  паросодержание  $x \approx (\rho''/\rho')(D_b/3\Delta n^2 l) K \ln(E_0/E)$ . При этом

$$C_b \sim \frac{2K \ln(E_0/E)}{\pi \Delta n^2 l D_b^2}.$$

температуре  $293^\circ\text{C}$  и  $P = 160$  атм  $\rho'' = 61 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho' = 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Т.к. скорость подъема пузырьков пара  $\sim 0,3$  м/с [10], а средняя скорость теплоносителя в активной зоне  $\approx 5,5$  м/с, то для оценок положим  $K \sim 1$ . Полагая  $E_0/E = e$ , получаем  $x \sim 0,2 D_b/l$ . При  $D_b \approx 1 - 5$  мм и  $l = 200$  мм  $x \sim (1 - 5) \times 10^{-3}$ , что соответствует 30 - 1 пузырькам пара в  $\text{см}^3$ .

Подчеркнём, что переход от (7) к (9), позволяющий включить оптические датчики в систему измерения и управления реактором, требует калибровки оптического датчика в конкретном типе реактора с помощью эталонного образца. Как отмечалось выше при штатном режиме работы эталонного образца по измеренному в определённом месте отношению  $E_0/E_{st}$  и измеренному в соответствующем месте контролируемого реактора отношению  $E_0/E$  определяются истинное паросодержание  $\varphi$  и, следовательно, сухость пара  $x$ , а также расходное паросодержание  $\beta(x)$  и влажность пара  $y = 1 - x$ .

Для повышения надёжности данного вывода проведём оценки зависимости оптической толщины среды от разности температур твэлов и кипящей воды. Плотность центров парообразования на технических поверхностях

$$N = C \left[ \frac{r \rho'' (T_w - T_s)}{\sigma T_s} \right]^2,$$

где  $C$  – константа, значение которой принимается в зависимости от материала теплообменной поверхности и рода кипящей жидкости;  $r$  – теплота парообразования;  $T_w$ ,  $T_s$  – температура теплообменной поверхности и температура насыщения кипящей жидкости;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения воды.

Счётная концентрация пузырьков  $C_b \approx \frac{N}{v} \nu$ , где  $\nu$  – частота отрыва паровых пузырьков,  $\nu$  – скорость их распространения в слой единичной толщины. При повышенных давлениях ( $P \geq 10^5$  Па) и малых числах Якоба

$$Ja = \frac{c_p(T_w - T_s)\rho'}{r\rho''} < 10,$$

где  $c_p$  – удельная теплоёмкость при постоянном давлении преобладающим является подвод теплоты в пузырек пара от поверхности нагрева. В этом случае определение частоты отрыва можно проводить по формуле:

$$\nu = \frac{8a\gamma Ja}{d_0^2},$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности жидкости;  $\gamma$  – коэффициент, учитывающий свойства жидкости и геометрию пузырьков пара ( $\gamma = 5 \div 10$ );  $d_0$  – отрывной диаметр пузырьков пара, который в случае, когда теплообменная поверхность твэла омывается вертикально восходящим пароводяным потоком, определяется по формуле

$$d_0 = \frac{\sqrt{(\zeta\rho'w^2)^2 + 72,6\sigma g(\rho' - \rho'') - \zeta\rho'w^2}}{8,55g(\rho' - \rho'')},$$

где  $\zeta$  – средний интегральный коэффициент лобового сопротивления пузырька;  $w$  – скорость потока. Использованные соотношения взяты из книги [10].

Далее полагая, что  $D_b \sim d_0$  и учитывая, что  $\frac{\Phi}{D_b} = \frac{\pi}{6} D_b^2 C_b \approx \approx \frac{4\pi\alpha\gamma}{3\nu} NJa$  выражение для  $\tau = 3\Delta n^2 l \frac{\Phi}{D_b}$  принимает вид

$$\tau = \frac{4\pi\alpha\gamma r c_p C_p \rho' \rho'' \Delta n^2 l}{\nu \sigma^2 T_s^2} (T_w - T_s)^3.$$

Таким образом, оптическая толщина слоя пароводяной смеси возрастает как куб разности температур теплообменной поверхности и температуры кипящей воды. Отметим, что в полученную зависимость не входит  $D_b \sim d_0$ .

На рис. 5 представлен вариант расположения оптического датчика в верхней части тепловыделяющей сборки (ТВС) РБМК-1000 [9]. На рис. 5а показан вид верхней части ТВС совместно с оптическим датчиком проходного типа. Пучок 11 распространяется от входного 1 до выходного 2 оптических расширителей пучка через перемещающийся вверх поток теплоносителя с выхода ТВС. На рис. 5б представлено горизонтальное сечение верхней части ТВС, соответствующее виду от плоскости А-А вниз на оптический датчик лазерной измерительной системы. Видно, что 11 последовательно пересекает поток теплоносителя, выходящий из трех выходных каналов 12 верхней части ТВС, что обеспечивает непрерывное измерение паросодержания в теплоносителе после прохождения его через ТВС.

Оптический датчик проходного типа, аналогичный представленному на рис. 5, может быть установлен в пространстве между верхней и нижней секциями ТВС, что показано на рис. 6.

Возможность установки оптических датчиков в активной зоне ядерного реактора обеспечивается тем, что в настоящее время промышленностью освоены волоконно-оптические линии и оптические элементы, способные работать в условиях высокого уровня радиации, а также в водной среде при высоких температурах и давлении окружающей среды. Измерительная аппаратура лазерной системы посредством волоконно-оптических линий может быть вынесена в безопасное в радиационном отношении помещение на расстояние до 1000 м.

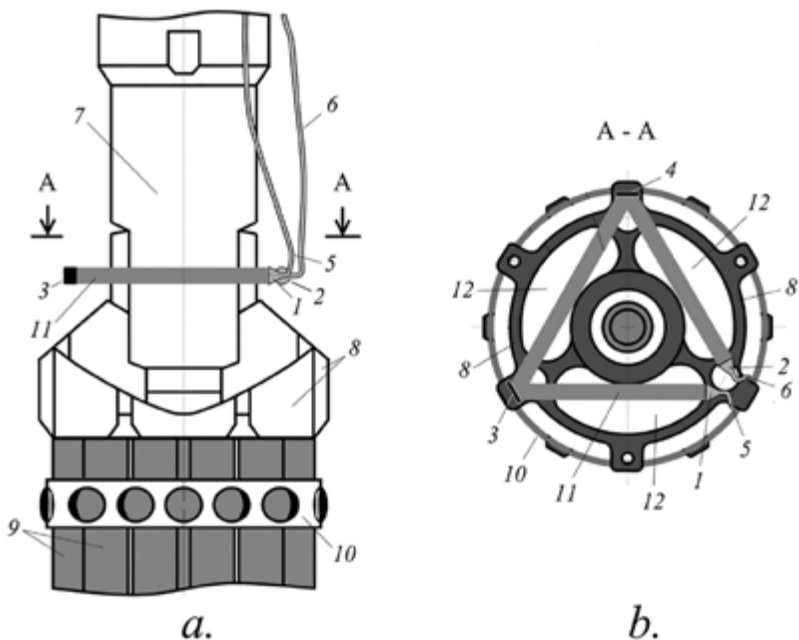


Рис. 5. Вариант размещения датчика в ТК РБМК: 1 – входной и 2 – выходной оптические расширители пучка; 3 и 4 – отражательные зеркала; 5 – входная и 6 – выходная волоконно-оптические линии; 7 – переходник и 8 – элементы конструкции ТВС; 9 – твэл; 10 – обод и дистанцирующие выступы; 11 – пучок зондирующего излучения; 12 – выходные каналы. Элементы крепления оптического датчика на элементах конструкции ТВС не показаны.

Итак, проведенный анализ показал возможность применения предлагаемого лазерного фотометрического метода для определения паросодержания в теплоносителе водных ядерных реакторов. При этом используются широко применяемые в науке и технике лазеры и фотоприемники видимого диапазона длин волн, хорошо распространяющихся в водной среде. Метод может применяться как в ВВЭР, где паросодержание мало ( $<5\%$ ), так и в РБМК-1000 и РБМК-1500, где паросодержание может достигать 20% и 40%. Погрешность измерения паросодержания составляет около 2%. Предлагаемый лазерный метод и система измерения паросодержания позволяют:

1. контролировать паросодержание в любой точке первого контура и в активной зоне ядерного реактора на выходе ТВС, а также внутри активной зоны ТК между двумя секциями ТВС;

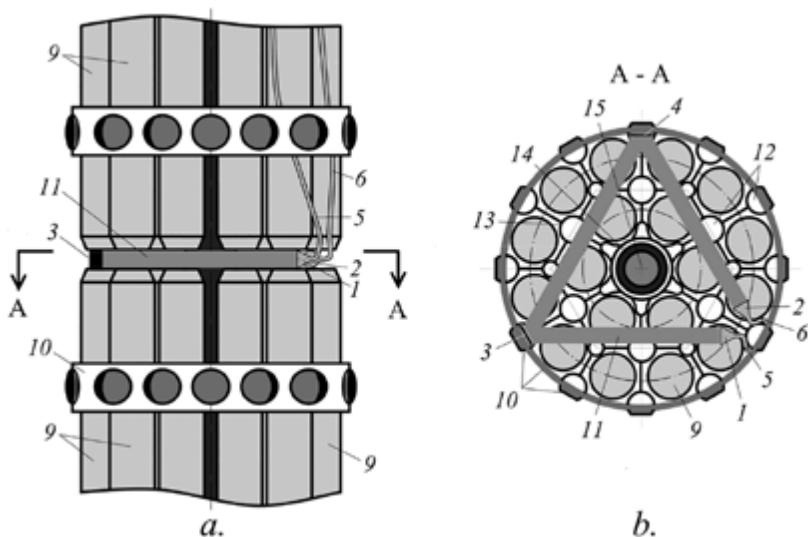


Рис. 6. Вариант размещения датчика в ТК РБМК между двумя секциями ТВС: названия элементов 1 – 6 и 9 – 11 такие же как и на рис.5; 12 – области тока теплоносителя, 13 – центрирующая решётка, 14 – центральная труба, 15 – несущий стержень. Элементы крепления оптического датчика на элементах конструкции ТВС не показаны.

2. обеспечить с высокой точностью мониторинг паросодержания в теплоносителе, а также измерение малых уровней паросодержания за счет высокой чувствительности метода;

3. повысить надежность аппаратуры измерительного комплекса, снизить радиационные нагрузки на обслуживающий персонал АЭС за счет выноса аппаратуры комплекса из зоны строгого режима и удаления её на значительное расстояние от реактора посредством волоконно-оптических линий, оставив в ней только оптические датчики не подверженные действию радиации;

4. повысить эффективность управления реактором и безопасность АЭС за счет формирования информационного массива данных о паросодержании в различных участках теплоносителя и активной зоны ядерного реактора;

5. Материалы данной работы использованы в заявке на патент и опубликованы в [19].



## Список литературы

1. Постников В.В. Способ безынерционного контроля паросодержания в теплоносителе ядерного реактора. Патент РФ № 2167457. – Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2001, № 14.
2. Семченков Ю.М., Мильто В.А., Шумский Б.Е. Способ и канал обнаружения кипения теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР. Патент РФ № 2437176. – Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2011, № 35.
3. Калинин П.В., Дадакин В.С., Чижевский Ю.Б. и др. Способ определения парового коэффициента реактивности на АЭС с реакторными установками типа РБМК. Патент РФ № 2136062. – Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 1999, № 24.
4. Манкевич С.К., Орлов Е.П. Система измерения концентрации борной кислоты в первом контуре теплоносителя ядерного энергетического реактора. – Патент РФ № 2594364. Бюллетень «Изобретения. Полезные модели», 2016, № 23, с. 321–324.
5. Манкевич С.К., Орлов Е.П. Абсорбционно-спектральный метод контроля характеристик теплоносителя в ядерном энергетическом реакторе. Препринт 12. ФИАН, 2015.
6. Манкевич С.К., Орлов Е.П. Абсорбционно-спектральный фотометрический метод измерения концентрации борной кислоты в теплоносителе контура охлаждения энергетического ядерного реактора. Атомная энергия, 2016, т. 121, вып.5, с. 265–269.
7. Манкевич С.К., Орлов Е.П., Филочкина Л.Л. Система измерения концентрации борной кислоты в контуре теплоносителя энергетического ядерного реактора. Патент РФ № 2606369. Бюл. «Изобретения. Полезные модели», №1.
8. Турбины тепловых и атомных электростанций. Под ред. А.Г. Костюка и В.В. Фролова. М.: Издательство МЭИ, 2001г.
9. Доллежалъ Н.А., Емельянов И.Я. Канальный ядерный энергетический реактор. М.: Атомиздат, 1980.
10. Фёдоров Л.Ф., Рассохин Н.Г. Процессы генерации пара на атомных электростанциях. М.: Энергоатомиздат, 1985.
11. Архитов В.А. Лазерные методы диагностики гетерогенных потоков. // Под ред. д.ф.-м.н. И.М. Васенина. Томск.: Издательство Томского университета, 1987.
12. Миропольский З.Л., Шнеерова Р.И., Карамышева А.И. Паросодержания при напорном движении пароводяной смеси с подводом тепла и в адиабатических условиях. – Теплоэнергетика, 1971, № 5, с. 60–64.
13. Стырикович М.А., Мартынова О.И., Миропольский З.Л. Процессы генерации пара на электростанциях. М.: Энергия, 1969. – 312 с.

14. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике (для научных работников и инженеров). Определения, теоремы, формулы. // Пер. со второго американского переработанного издания И.Г. Арамановича, А.М. Березмана, И.А. Вайнштейна, Л.З. Румшицкого, Л.Я. Цлафа. Под общей ред. И.Г. Арамановича.

15. *Вукалович М.П.* Теплофизические свойства воды и водяного пара. М.: Машиностроение, 1967.

16. *Шелегов А.С., Лескин С.Т., Слободчук В.И.* Физические особенности и конструкция реактора РБМК-1000: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2011.

17. *Г. Ванн де Хюлст.* Рассеяние света малыми частицами // Пер. с англ. Т.В.Водопьяновой под ред. В.В.Соболева. М.: Изд. иностранной литературы, 1961. 536 с.

18. *Росс М.* Лазерные приемники. // Перевод с англ. под ред. А.В. Иевского. М.: Мир», 1969. 519 с.

19. *Манкевич С.К., Орлов Е.П.* Лазерная система измерения паросодержания в теплоносителе ядерного энергетического реактора. Заявка на изобретение № 2017109128 от 20.03.2017. Опубликовано 29.06.2017. Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2017, №19.



Отделение физических наук

С.К. Манкевич, Е.П. Орлов

**Лазерный метод измерения паросодержания в водном  
теплоносителе энергетического ядерного реактора**

Формат 60 x 84/16  
Гарнитура Таймс  
Усл. печ. л. 2,7. Усл. изд. л. 2,5  
Тираж 20 экз.

Издатель – Российская академия наук

Подготовлено к печати  
Управлением научно-издательской деятельности РАН

Отпечатано на оборудовании Управления делами РАН

Издано в авторской редакции

Издается в соответствии с распоряжением  
президиума Российской академии наук  
от 24 октября 2017 г. №10106-765,  
распространяется бесплатно.