

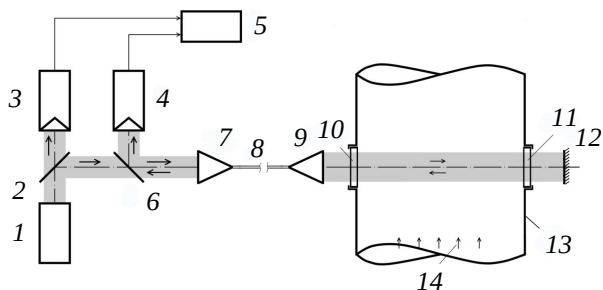
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 543.422.3-7:621.039.564

ЛАЗЕРНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПАРОСОДЕРЖАНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ВОДНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Манкевич С.К. (НПО «Астрофизика», г. Москва), Орлов Е.П. (ФИАН, г. Москва)

В настоящем сообщении рассматривается лазерный фотометрический метод измерения паросодержания теплоносителя водного ядерного реактора [1]. Зондирующий лазерный импульс видимого диапазона длины волны вводится в теплоноситель, протекающий, например, в трубопроводе первого контура ВВЭР, пароводяной коммуникации РБМК или байпаса этих трубопроводов, с помощью волоконно-оптической линии 8 с расширителями 7, 9 (рис. 1). На обратном пути, отразившись от зеркала 12, он поступает на фотоприемник 4, который измеряет энергию импульса E . На второй фотоприемник 3 одновременно поступает исходный зондирующий лазерный импульс энергией E_0 . В компьютере 5 формируется информация об отношении E_0/E , которое характеризует ослабление зондирующего импульса после прохождения через теплоноситель реактора, обусловленное рассеянием излучения на пузырьках пара. По ослаблению определяется паросодержание теплоносителя во время прохождения зондирующего импульса. Оптический датчик, изображенный на рис. 1, является отражательным. В некоторых зонах реактора удобнее устанавливать оптический датчик проходного типа, в котором отражатель 12 заменен на расширитель пуч-



Р и с. 1. Блок-схема измерительной системы: 1 — лазер; 2, 6 — полупрозрачное зеркало; 3, 4 — фотоприемники; 5 — ЭВМ; 7 — адаптер волокна; 8 — волоконно-оптическая линия; 9 — расширитель лазерного пучка; 10, 11 — оптические иллюминаторы-окна; 12 — отражательное зеркало; 13 — трубопровод первого контура ВВЭР, пароводяной коммуникации РБМК или байпас этих трубопроводов; 14 — направление движения теплоносителя

ка, который принимает прошедшее через теплоноситель излучение и направляет его посредством второй волоконно-оптической линии на вход 4.

Рассмотрим возможности данного метода сначала на монодисперсной пароводяной смеси. Оптическая толщина монодисперсной среды $\tau = 1,5\Delta n^2 \varphi(x) Ql/d_n$, где $\Delta n = n_v - n_n \sim 0,33$ — разность показателей преломления воды и водяного пара; $\varphi = (\pi/6)d_n^3 C_n$ — истинное объемное паросодержание [3, 4]; d_n — диаметр пузырьков пара; C_n — их счетная концентрация; Q — эффективность ослабления зондирующего излучения [2]; l — расстояние, проходимое им в пароводяной смеси. На рис. 1 l — удвоенное расстояние между элементами 10 и 11. Если на слой пароводяной смеси падает лазерный импульс энергией E_0 , то на выходе из слоя фотоприемником 4 регистрируется энергия

$$E = E_0 \exp(-\tau). \quad (1)$$

Истинное объемное паросодержание φ с учетом оптической толщины слоя τ и выражения (1) можно выразить через регистрируемое ослабление энергии зондирующего излучения

$$\varphi = [d_n / (3\Delta n^2 l)] \ln(E_0/E). \quad (2)$$

Сухость пара x , являющаяся основным искомым параметром пароводяной смеси, выражается не через истинное паросодержание φ , а через расходное паросодержание β [3, 4] как

$$x = [1 + (\rho_v/\rho_n)(1 - \beta)/\beta]^{-1}, \quad (3)$$

где ρ_n , ρ_v — плотность сухого пара и воды соответственно.

Так как истинное объемное паросодержание φ в активной зоне реактора может существенно отличаться от расходного β из-за уноса пузырьков восходящим потоком воды, то для ее нахождения по ослаблению зондирующего излучения необходимо

расходное паросодержание выразить через истинное объемное паросодержание ϕ .

Дальнейший анализ проведем на примере технологического канала РБМК. Истинное объемное паросодержание в нем связано с расходным соотношением $\phi(\beta, K) = [1 + (1 - \beta)K/\beta]^{-1}$, где $K(\beta) = 1 + 3a(1/5 + \beta^2/2)$ — коэффициент проскальзывания фаз; $a = (1 - P/P_{кр})/(w_0/gd_f)^{1/4}$; P — давление пароводяной смеси; $P_{кр} = 22,1$ МПа — критическое давление; $w_0 = G/\rho_v S$ — скорость циркулирующего теплоносителя; G — его массовый расход; S — гидравлический диаметр сечения и его проходная площадь; g — ускорение свободного падения; $d_f = 4S/\Pi$; Π — смоченный периметр сечения.

Подставляя выражение для коэффициента проскальзывания фаз $K(\beta)$ в соотношение $\phi(\beta, K)$, получаем относительно β кубическое уравнение. Его решение, дающее зависимость $\beta(\phi)$, может быть получено аналитически. В результате, принимая во внимание выражение (3) для сухости пара, находим зависимость сухости пара от истинного объемного паросодержания $x(\phi)$, в которой учтены параметры технологического канала РБМК и измеренное фотоприемником ослабление лазерного излучения E_0/E .

Для оценки сухости пара x по полученной зависимости необходима информация о диаметре пузырьков пара. В канале он варьирует от нескольких микрон до нескольких миллиметров. При длине волны зондирующего излучения $\lambda = 0,5 \cdot 10^{-6}$ м параметр $\pi d_n/\lambda > 30$ [3]. При этом эффективность ослабления зондирующего излучения Q выходит на асимптотическое значение, равное 2.

Так как пузырьки имеют разный диаметр, то в выражении (2) вместо d_n будет фигурировать диаметр Соттера d_{32} , который в конкретном случае можно определить с помощью эталонного технологического канала, в котором твэлы заменены на калиброванные электронагреватели такой же мощности, а истинное объемное паросодержание в штатном режиме (эталонное) ϕ_0 известно. Зондируя в нем слой теплоносителя такой же толщины, что и в контролируемом, находим $d_{32} = 3\Delta n^2 l \phi_0 / \ln(E_0/E_0)$, где E_0 — энергия излучения на выходе слоя. Подставляя в выражение (3), получаем

$$\phi = \phi_0 \ln(E_0/E) / \ln(E_0/E_0). \quad (4)$$

Таким образом, по ослаблению зондирующего лазерного излучения E_0/E и E_0/E_0 вычисляются истинное паросодержание ϕ и сухость пара x на основании полученной зависимости $x(\phi)$. В проведенных оценочных расчетах использовались стандартные параметры технологического канала РБМК. В ре-

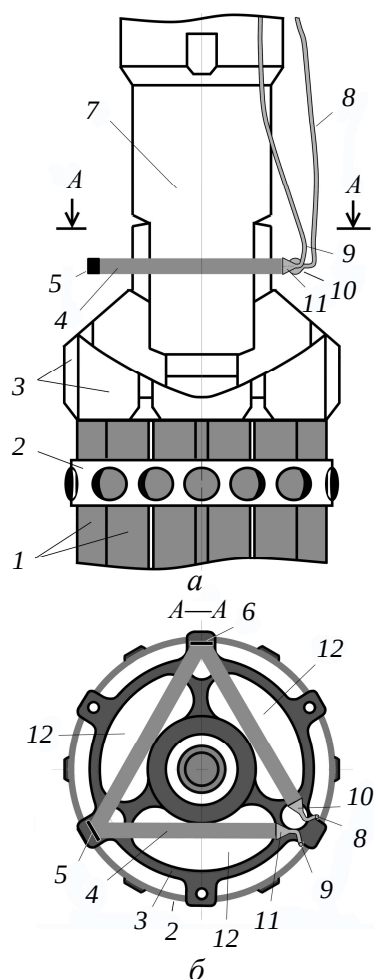
зультате получены следующие оценки измерения параметров водного теплоносителя. Истинное паросодержание $\phi = 0,52$ отвечает штатному режиму работы технологического канала, при котором сухость пара $x = 0,145$ (14,5%). При 50%-ной мощности канала этой сухости отвечает $\phi = 0,49$. Значения $\phi = 0,59$ и $\phi = 0,56$ отвечают максимально допустимой сухости пара 19,6% при полной и 50%-ной мощности канала.

Энергию лазерных импульсов, требуемую для просвечивания слоя теплоносителя заданной толщины, можно оценить, используя выражение (2), $\phi(\beta, K)$, $K(\beta)$ и $\beta(x) = [1 + (\rho_n/\rho_v)(1 - x)/x]^{-1}$, полученное из выражения (3). В экспериментах, моделирующих парообразование в технологическом канале с помощью воздушно-водяной смеси, диаметр пузырьков воздуха составлял 2—15 мм. Положив диаметр Соттера 2 мм и используя типичные характеристики фотоприемников видимого диапазона, находим, что при сухости пара $x \sim 0,2$ и толщине пароводяного слоя $l = 200$ мм требуемая энергия ~ 2 нДж. Это позволяет использовать в измерительной аппаратуре маломощные полупроводниковые лазеры.

Погрешность определения сухости пара x можно оценить, используя полученную зависимость сухости пара от истинного паросодержания $x(\phi)$. При стандартных параметрах технологического канала она составляет около 2%.

В первом контуре и активной зоне ВВЭР паросодержание должно быть близко к нулю и важна чувствительность метода. Для ее оценки учтем, что при малом истинном паросодержании ϕ сухость пара $x \sim \rho_n/\rho_v (d_n/3\Delta n^2 l) K \ln(E_0/E)$. Так как скорость подъема пузырьков пара намного меньше средней скорости теплоносителя в активной зоне, то коэффициент проскальзывания фаз $K \sim 1$. При 293 °С и 16,2 МПа плотность пара и воды $\rho_n = 61$ кг/м³, $\rho_v = 10^3$ кг/м³ соответственно. Полагая ослабление зондирующего излучения до 30%, получаем минимально измеряемую сухость пара $x \sim 0,02 d_n/l$. При диаметре пузырьков пара $d_n \sim 2$ мм и толщине просвечиваемого пароводяного слоя $l = 200$ мм точность измерения и минимально измеряемая сухость пара составляет $x \sim 2 \cdot 10^{-4}$, что соответствует примерно 10 пузырькам пара в 1 см³ теплоносителя.

На рис. 2, а показан вариант размещения оптического датчика проходного типа в верхней части ТВС РБМК, на рис. 2, б — горизонтальное сечение этой части, соответствующее виду от плоскости А—А вниз на оптический датчик. Установка оптических датчиков в активной зоне ядерного реактора возможна, поскольку в настоящее время освоены волоконно-оптические линии и оптические элементы, способные работать в условиях высокого уровня ра-



Р и с. 2. Вариант размещения датчика в технологическом канале РБМК: 1 — твэл; 2 — обод и дистанцирующие выступы; 3 — элементы конструкции ТВС; 4 — пучок зондирующего излучения; 5, 6 — отражательные зеркала; 7 — переходник; 8, 9 — входная и выходная волоконно-оптическая линия; 10, 11 — входной и выходной оптический расширитель пучка; 12 — выходные каналы (элементы крепления оптического датчика на элементах конструкции ТВС не показаны)

диации, в водной среде при высокой температуре и давлении. Измерительная аппаратура лазерной системы посредством волоконно-оптических линий может быть вынесена в безопасное в радиационном отношении помещение на расстояние более 25 м.

Предлагаемый лазерный метод и система измерения паросодержания позволяют контролировать паросодержание внутри активной зоны технологического канала РБМК, измерять благодаря высокой чувствительности метода малый уровень паросодержания в любой точке первого контура и активной зоны ВВЭР, повысить надежность аппаратуры измерительного комплекса и снизить радиационные нагрузки на обслуживающий персонал АЭС за счет выноса аппаратуры комплекса из зоны строгого режима и ее удаления на значительное расстояние от реактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Манкевич С.К., Орлов Е.П. Лазерная система измерения паросодержания в теплоносителе ядерного энергетического реактора. Заявка № 2017109128 от 20.03.2017. — Бюллетень «Изобретения. Полезные модели», 2017, № 19, с. 248—251.
2. Архипов В.А. Лазерные методы диагностики гетерогенных потоков. Под ред. И.М. Васенина. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1987.
3. Доллежал Н.А., Емельянов И.Я. Канальный ядерный энергетический реактор. М.: Атомиздат, 1980.
4. Федоров Л.Ф., Рассохин Н.Г. Процессы генерации пара на атомных электростанциях. М.: Энергоатомиздат, 1985.

Поступило в Редакцию 25.04.17

УДК 519.24

РАСЧЕТЫ ПО ПРОГРАММЕ ПРИЗМА-ДСП РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЧЕК ДЕЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ ТЕСТ2, ПРЕДЛОЖЕННОЙ OECD/NEA

Кандиев Я.З., Лобанова Л.В., Серова Е.В. (РФЯЦ — ВНИИТФ, г. Снежинск, Челябинская обл.)

Для расчета размножающих систем со слабыми связями разработана методика, реализованная в программе ПРИЗМА-ДСП [1, 2]. В ходе разработки, кроме других, проводились расчеты в исследовательском режиме четырех тестов, предложенных международной экспертной группой OECD/NEA [3]. В воде

и водных растворах учитывалась химическая связь атомов.

В настоящей работе приведены результаты расчетов теста 2 с системой констант ENDF/B VI.

Тест 2. Одиночный твэл помещается в прямоугольную ячейку, заполненную водой, стенки кото-