УДК 621.039.534.6

P

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА НАТРИЯ В ТЕПЛОВОЙ ТРУБЕ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДАТЧИКА

<u>Н.И. Логинов, А.С. Михеев, А.А. Мухлынин</u>

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского, г. Обнинск

Описаны конструкция электромагнитного преобразователя и метод измерения расхода натрия в вертикальной тепловой трубе диаметром 100 мм и длиной 10 м с рабочей температурой 550–650°С. Тепловая труба имеет капиллярную структуру только в зоне испарения, т.е. представляет собой термосифон с неразделенными встречными потоками жидкости и пара.

Магнитное поле преобразователя создавалось постоянным магнитом, изготовленным из термостабильного сплава, работоспособного при температуре до 600°С. Проведены измерения расхода в трех поперечных сечениях трубы, в четырех «точках» по окружности каждого сечения. Приведены результаты измерений в одном сечении. Наблюдаются значительные колебания локальных значений расхода, максимальная амплитуда которых превышает среднее во времени значение в два-три раза. Имеют место отрицательные значения локального расхода, т. е. течение натрия в обратном направлении, против силы тяжести. Это свидетельствует об уносе жидкого натрия встречным потоком пара, скорость которого достигала 80 м/с и более.

Ключевые слова: тепловые трубы, термосифон, система аварийного расхолаживания быстрых натриевых реакторов, измерение расхода, электромагнитный датчик.

Key words: heat pipes, thermosyphon, emergency cooling system of fast sodium reactors, flow measurement, electromagnetic sensor.

ВВЕДЕНИЕ

Тепловые трубы с натрием в качестве теплоносителя могут использоваться в системах аварийного охлаждения теплоэнергетических установок, в том числе и атомных, работающих при температуре выше 600°С. На основе газорегулируемых тепловых труб могут быть созданы полностью пассивные системы аварийного охлаждения. Концепция такой системы была предложена в [1, 2]. Тепловые трубы в таких системах будут иметь длину десять и более метров и диаметр более 100мм. Для обоснования теплопередающих характеристик тепловых труб необходимо исследовать гидродинамику жидкой и паровой фаз теплоносителя. В работе описан метод измерения и приводятся некоторые результаты экспериментальных

© Н.И. Логинов, А.С. Михеев, А.А. Мухлынин, 2012



Рис. 1. Расходомер с ш-образным магнитом: 1 – прижимная пластина; 2 – корпус направляющего аппарата циркуляционного насоса; 3 – корпус датчика; 4 – постоянный магнит; 5 – электрод; 6 – стенка корпуса датчика

исследований расхода натрия, стекающего из зоны конденсации тепловой трубы в зону испарения, а также распределение расхода по внутреннему периметру поперечного сечения трубы и по ее высоте.

Широко известен электромагнитный метод измерения расхода жидких металлов в трубопроводах и локальной скорости в различных аппаратах, основанный на законе электромагнитной индукции – законе Фарадея [3, 4]. Разработано много разнообразных конструкций расходомеров и датчиков скорости, работающих на этом принципе. Так, например, в [3] рассматривается измеритель скорости движения морского судна относительно воды. Рассмотрена теория этого измерителя, обосновывающая применимость такого прибора, но указывается, что на практике требуется эмпирическая тарировка. В [4] описана конструкция аналогичного прибора для измерения расхода натрия в направляющем аппарате циркуляционного насоса первого контура БН-600. Прибор был из-

готовлен, проградуирован на экспериментальном стенде Физико-энергетического института и испытан в ОКБМ (Нижний Новгород) в составе циркуляционного насоса, предназначавшегося для первого контура БН-600. Принципиальное устройство этого датчика показано на рис. 1. Ш-образный постоянный магнит создает магнитное поле, пронизывающее металлическую неферромагнитную стенку и примыкающую к ней область потока натрия.

При движении натрия в направлении оси *Z*, т. е. перпендикулярно плоскости рисунка, в нем индуцируется электродвижущая сила, пропорциональная скорости движения *W*. Индуцированные в натрии электрические токи замыкаются через металлическую стенку и создают падение напряжения между электродами, приваренными к стенке в точках A и Б. Неблагоприятной особенностью такого датчика является то, что индуцированная ЭДС в каждой точке потока, пропорциональная произведению магнитной индукции на скорость натрия, создает напряжение между электродами, пропорциональное интегралу от этого произведения по области существования магнитного поля.

С учетом этих прототипов был разработан датчик для измерения пространственного и временного распределений расхода по периметру поперечного сечения тепловой трубы (а точнее – термосифона), созданной для экспериментальной проверки возможности и целесообразности осуществления концепции системы аварийного расхолаживания реактора, предложенной в [1, 2].

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ДАТЧИКА

На рисунке 2 показано схематическое устройство датчика и его расположение на тепловой трубе, а также силовые линии магнитного поля и линии тока, индуцированного в натрии при движении в магнитном поле. Толщина пленки натрия, стекающего по внутренней поверхности трубы, показана условно. В точках *a* и *b* к



Рис. 2. Расположение датчика относительно трубы

наружной поверхности трубы приварены электроды, напряжение между которыми и является выходным сигналом датчика.

В соответствии с законом Фарадея в простейшем случае индуцированная в проводнике, движущемся в магнитном поле, ЭДС выражается формулой

$$E = BWL, \tag{1}$$

где *B* – магнитная индукция; *W* – скорость движения проводника относительно магнитного поля; *L* – длина проводника. В данном случае *W* – скорость движения натрия, а *L* – расстояние между точками *a* и *b*. Напряжение между этими точками на стенке трубы выражается формулой

$$U = E \cdot R_{\rm c} / (R_{\rm w} + R_{\rm c}), \tag{2}$$

где R_c и R_{\star} – электрическое сопротивление стенки и жидкости соответственно. Эти сопротивления (на единицу длины трубы) выражаются формулами

$$R_{\rm c} = \rho_{\rm c} \cdot L / \Delta_{\rm c} ; R_{\rm m} = \rho_{\rm m} \cdot L / \Delta_{\rm m}, \tag{3}$$

где $\Delta_{\mathbf{w}}$ – толщина пленки натрия, стекающего по стенке трубы.

Следовательно,

$$U = BWL \cdot (\rho_c / \Delta_c) / (\rho_c / \Delta_c + \rho_w / \Delta_w).$$
(4)

Таким образом, если известны численные значения магнитной индукции В, расстояния между электродами L, удельных сопротивлений стенки и жидкости ρ_c и $\rho_{\rm ж}$ и толщин Δ_c и $\Delta_{\rm ж}$, то, измерив напряжение U, по формуле (4) можно определить среднюю скорость пленки натрия W на участке периметра трубы между точками 1 и 2.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В реальных условиях магнитная индукция на участке трубы между точками *a* и *b* неодинакова как по величине, так и по направлению. Скорость натрия по толщине пленки жидкости тоже непостоянна, и толщина пленки неизвестна. Поэтому целесообразно перейти к объемному расходу натрия на участке пленки между точками 1 и 2, который равен

$$V = WL\Delta_{\mathcal{H}}.$$
(5)

Из формул (1)-(5) следует

$$I' = (U \cdot \Delta_{\mathsf{H}}/B)(1 + \rho_{\mathsf{H}}\Delta_{\mathsf{c}}/\rho_{\mathsf{c}}\Delta_{\mathsf{H}}).$$
(6)

Формула (6) и является основой методики измерения расхода. Измерив напряжение между точками *a* и *b*, можно судить о расходе натрия на этом участке периметра поперечного сечения трубы с точностью до коэффициента *K*, равного

$$\mathcal{K} = (\Delta_{\mathsf{W}}/B)(1 + \rho_{\mathsf{W}}\Delta_{\mathsf{c}}/\rho_{\mathsf{c}}\Delta_{\mathsf{W}}), \tag{7}$$

который необходимо определить эмпирически.

111

Поскольку все физические величины, входящие в формулы (1)–(7) связаны между собой линейными зависимостями, то для общего расхода по всему периметру трубы будет справедлива формула

$$\sum_{i} V_{i} = K \sum_{i} U_{i}.$$
(8)

В левой части формулы (8) стоит сумма расходов по всем участкам периметра, а в правой – сумма напряжений по всем этим участкам; *К* – тот же самый коэффициент, что и в формуле (7).

Суммарный расход жидкого натрия в тепловой трубе можно определить по тепловой мощности, переносимой из зоны испарения в зону конденсации:

$$\rho \sum_{i} V_{i} = Q / r, \qquad (9)$$

где ρ – плотность натрия, Q – тепловая мощность, r – теплота испарения натрия. Таким образом, эмпирический градуировочный коэффициент можно найти по формуле

$$K = V_i / U_i = (QL/\pi D) / U_i, \tag{10}$$

где *D* – внутренний диаметр тепловой трубы. Теперь по измеренному напряжению на *i*-ом участке периметра можно судить о расходе на этом участке.

Следует, однако, заметить, что толщина и скорость пленки непостоянны во времени и колеблются случайным образом. Поэтому формула (8) справедлива лишь для осредненных по времени величин, входящих в нее, за период времени, много больший периода колебаний усредняемых величин. При этом постулируется, что данный колебательный процесс является стационарным случайным процессом, т.е. осредненная величина не зависит от времени, разумеется, при неизменных прочих условиях.

Формулы (1) и (4) позволяют предварительно оценить выходной сигнал датчика.

Магнитная индукция В на внутренней поверхности стенки трубы составляла около 0,2 тесла, расстояние между электродами L = 0,022 м. Априори известно, что скорость течения пленки W составляет десятые доли мера в секунду. Тогда индуцированная ЭДС при скорости 0,1 м/с составит E = 0,2.0,1.0,022 = 0,00044 В, или 0,44 мВ. При толщине пленки натрия 1 мм коэффициент в формуле (4) равен 0,64, тогда выходной сигнал датчика U = 0,28 мВ. Этого вполне достаточно для измерений с необходимой точностью.

Для регистрации результатов экспериментов использовалась быстродействующая система измерений, построенная на стандартных усилительных модулях АЦП и персональном компьютере. Скорость измерений составляла 1000 с⁻¹. Запись сигнала в каждом положении производилась в течение 60 с, т.е. каждая реализация содержала 60000 численных значений сигнала.

Перед каждым измерением производился «холостой» замер — измерение напряжения между электродами без магнита, т. е. при нулевом полезном сигнале. Это позволяло учесть возможные помехи, термоЭДС и смещение нуля усилителей.

Измерения проводились на вертикальной тепловой трубе высотой 10 м в четырех положениях по окружности трубы, в трех поперечных сечениях по высоте, отстоящих друг от друга на 700 мм. Наружный диаметр трубы 102 мм, внутренний – 96 мм. Нижняя часть трубы, около двух метров, снабжена капиллярно-пористой структурой, изготовленной из пористого никеля толщиной 4 мм. Магнит выполнен в форме параллелепипеда с размерами 50×40×17 мм. Материал магнита – железоникелькобальтовый сплав ЮНДК35Т5, работоспособный при температуре до 600°С в течение 1000 ч с потерей магнитной индукции не более 1%. Магнит помещен в тонкостенный кожух из нержавеющей стали с зазором около 1 мм, через который можно продувать охлаждающий воздух. Электроды, с которых снимается выходной сигнал, могут быть закреплены на кожухе и прижиматься к стенке трубы на время измерения вместе с магнитом или привариваться к стенке трубы в заранее выбранных местах.

Схема и внешний вид экспериментальной установки показаны на рис. 3. Длина зоны нагрева тепловой трубы составляла 1 м. Нагреватели печи – 12 стержней из карбида кремния. Каждый стержень может выделять до 10 кВт тепла. Длина зоны конденсации составляла 8 м. Отвод тепла осуществлялся водяным холодильником. Между холодильником и тепловой трубой имеется кольцевой зазор, заполняемый газом (воздух, аргон, гелий). Холодильник состоит из восьми секций, соединенных последовательно по потоку воды. Для обеспечения возможности измерения расхода натрия с помощью датчика, расположенного снаружи трубы, четыре нижних секции холодильника были удалены. Таким образом, в дан-НОМ СЛУЧАЕ ДЛИНА ЗОНЫ КОНДЕНСАЦИИ ТЕПЛО- Рис. 3. Схема и внешний вид установки вой трубы составляла 4 м.



Опыты проводились при температуре трубы 550-600°С. Внутри тепловой трубы вдоль ее оси имеются две герметично вваренные гильзы, в которых расположены 16 термопар. Размещение термопар по высоте показано на рис. 3. Тепловая мощность, отводимая тепловой трубой, вычислялась по расходу воды в холодильнике и ее подогреву.

Градуировка датчика производилась по результатам измерения его выходного сигнала в четырех позициях верхнего ряда в соответствии с методикой, изложенной выше. В результате этого был найден градуировочный коэффициент, который оказался равным 50 мкB/(см³/с).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Было проведено три серии опытов при трех различных значениях тепловой мощности, отводимой в зоне конденсации. На рисунке 4 приведены результаты одного из опытов. На этом рисунке представлены результаты измерений в каждой позиции только за шесть секунд из 60-ти, поскольку полную запись представить графически невозможно на одной странице.

Из рисунка прежде всего видно, что расход сконденсировавшегося натрия непостоянен во времени, колеблется случайным образом. Амплитуда колебаний превосходит среднее значение в три раза и более. Среднее во времени значение расхода неодинаково по окружности поперечного сечения трубы: максимальное значение в три раза больше минимального. Частота колебаний также непостоянна, изменяется в пределах 1–3 Гц, увеличиваясь с увеличением расхода. Наблюдаются отрицательные значения расхода, не превышающие 25% от среднего по периметру значения.



Рис. 4. Распределение расхода натрия по периметру трубы в трех поперечных сечениях по высоте: верхний ряд – в сечении перед началом зоны конденсации, в четырех точках периметра, через 90 градусов по окружности; средний ряд – то же, на 700 мм ниже первого сечения; нижний ряд – то же, на 1400 мм ниже первого сечения

Как отмечалось выше, перед каждым измерением производился «холостой» замер – измерение напряжения между электродами без магнита, т.е. при нулевом полезном сигнале, для того чтобы учесть возможные помехи, термоЭДС и смещение нуля усилителей. Соотношение полезного сигнала и помех показано для одного из замеров на рис. 5. На этом рисунке слева представлена запись помех, которые состоят из постоянной составляющей 0,051 и переменной составляющей ±0,003 от верхнего предела измерения, равного 200 мкВ (т.е. 10,2 мкВ и ±0,6 мкВ). Среднее значение полезного сигнала, представленного справа, равно 0,4 (80 мкВ). При обработке данных, представленных на рис. 3, постоянная составляющая помех учтена, а переменная – составляет менее одного процента от измеряемой величины. Эти данные относятся к области наименьшей тепловой мощности и, соответственно, малых расходов, т.е. представляют наихудший случай. При более высоких значениях тепловой мощности уровень помех оставался тем же самым, а



Рис. 5. Сравнение помех (слева) и полезного сигнала (справа)

выходной сигнал, средний по периметру, увеличивался пропорционально мощности.

На некоторых графиках рис. 4 видно, что сигнал датчика ограничен сверху. Это ограничение соответствует верхнему пределу шкалы усилителя.

Наблюдаемые явления можно интерпретировать следующим образом.

1. Неравномерность расхода натрия по окружности поперечного сечения трубы, скорее всего, связана с неравномерностью ширины газового зазора между трубой и холодильником, т.е. неконцентричным расположением холодильника относительно тепловой трубы.

2. Увеличение расхода вниз по потоку натрия объясняется тем, что на транспортном участке трубы между верхним и нижним сечениями, в которых проводились измерения, происходила конденсация пара вследствие несовершенства теплоизоляции.

3. Отрицательные значения расхода свидетельствуют об уносе жидкого натрия встречным потоком пара, скорость которого достигала 88 м/с.

4. Большие положительные значения расхода, втрое превышающие среднее значение, в основном, обусловлены увеличением скорости, а не толщины пленки. Поскольку увеличение толщины пленки сказывается только на уменьшении шунтирующего действия стенки трубы, то даже трехкратное увеличение толщины пленки (при постоянной скорости) может привести к увеличению выходного сигнала всего на 35–60%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально показана возможность измерения расхода жидкометаллического теплоносителя по внутренней поверхности транспортной зоны термосифонов с помощью локального электромагнитного датчика. Используемый датчик имеет чувствительность 50 мкВ/(см³/с), достаточную для измерения с приемлемой точностью.

Показано, что расход непостоянен во времени, имеет пульсирующий характер с резкими всплесками, превышающими среднее значение в два-три раза и возникающими с частотой в несколько герц.

Показано, что встречное движение пара тормозит поток жидкости и даже изменяет его направление на противоположное. Этот процесс также имеет пульсирующий характер.

Преложенная методика измерения может быть использована при экспериментальном обосновании конструкции термосифонов и тепловых труб, которые, возможно, будут использоваться в системах аварийного расхолаживания и передачи тепла высокотемпературных атомных реакторов [5, 6].

Для тепловых труб, снабженных капиллярной структурой на всей длине, методика измерений упростится, так как жидкий теплоноситель течет в капиллярной структуре, толщина которой известна. В этом случае выходной сигнал датчика будет однозначно определяться скоростью теплоносителя. Кроме того течение будет более устойчивым, что повысит точность измерений.

Литература

1. Логинов Н.И., Михеев А.С. О концепции испарительно-конденсационной системы аварийного расхолаживания быстрых натриевых реакторов/Тезисы докладов на отраслевой конференции «Теплофизика-99», Гидродинамика и безопасность АЭС. – Обнинск, 1999. – С. 220.

2. Loginov N., Mikheyev A. On Concept of Heat-Pipe Emergency Core Cooling System for Fast Sodium Fission Reactors/Proceedings of the 12th International Heat pipe Conference. (Russia, 2002). – P. 444.

3. Шерклиф Дж. Теория электромагнитного измерения расхода. – М.: МИР, 1965. – С. 138.

4. *Логинов Н.И.* Электромагнитные преобразователи расхода жидких металлов. – М. Энергоиздат, 1981.

5. Поплавский В.М., ЗабудькоА.Н., Петров Э.Е. и др. Быстрый натриевый реактор как источник тепловой энергии для высокотемпературных технологий//Атомная энергия. – 2009. – Т. 106. – Вып. 3. – С. 125-135.

6. Sabharwall P., Gannerson F. Engineering design elements of two-phase thermosyphon for the purpose of transferring NGNP thermal energy to a hydrogen plant//Nuclear Engineering and Design. – 2009. – 239. – P. 2293-2301.

Поступила в редакцию 11.11.11

A slider bearing working in the medium of the heavy liquid metal coolants is one of the main elements which influence the efficiency of the main circulating pumps in the reactor loops with HLMC.

The operating efficiency of the slider bearing is mainly determined with the correct choice of its constructive relation: a relative annular gap, relative width, angle of contact.

The results of the experimental research have shown that the difference between hydraulic characteristics of water and HLMC coolants in the experimental plot «throttle-annular gap» exists. It makes the usage of the traditional lubricating fluid in the methods of analysis of the hydrostatic sliding bearings for the pumps in the HLMC incorrect.

УДК 621.039.526

Calculations and Experimental Investigation of Irradiation Heat Rate in BOR-60 Reactor\A.V. Varivtsev, I.Yu. Zhemkov, O.V. Ishunina, Yu.V. Naboyshchikov, V.A. Neverov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 8 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 6 titles.

Calculations and experimental investigation of irradiation heat rate in reactor BOR-60 reveals drawbacks of modern calculational methods. Paper propose algorithm for irradiation heat rate calculations, which allows to eliminate these drawbacks.

УДК 621.039.543: 621.039.524.44

The Substantiation of the Correlation for Critical Heat Flux Calculation for Alternative Design Fuel Assemblies with Mixing Spacer Grids in VVER-1000\S.M. Dmitriev, V.E. Lukyanov, O.B. Samoylov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 8 illustrations. – References, 6 titles.

The results of the experimental investigations of coolant mixing and departure from nucleate boiling in TVSA-T with combined spacer grids and mixing grids on aerodynamic and thermal test facilities are presented. As a result of the obtained experimental data, the determination of mixing coefficient was carried out and the CRT-1 correlation for the critical heat flux calculation was developed. The applicability of correlation for critical heat flux calculation for TVSA-T VVER-1000 was substantiated.

УДК 621.039.534.6

The Method Based on Electromagnetic Sensor for Measuring of Sodium Flow Rate in a Heat Pipe \N.I. Loginov, A.S. Mikheev, A.A. Mukhlinin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 8 pages, 5 illustrations. – References, 6 titles.

The electromagnetic sensor design and method of liquid flow measuring in the vertical sodium heat pipe 100 mm diameter and 10 m length at operating temperature 550–650°C are described. The heat pipe was supplied with capillary structure only in the evaporation zone, i.e. it was a thermosyphon with nonseparated opposite flows of liquid and vapor.

Magnetic field of the sensor was produced by permanent magnet, made of thermostable alloy, which is efficient up to 600 oC. Flow measurements at three cross sections of the heat pipe, at four «points» of circumference of each section, were carried out. Significant fluctuations of the local flow rate values were observed. Maximum amplitude of the fluctuations exceeds the average value of the flow rate up to 2-3 times. Negative values of the local flow rate were observed. It means that liquid sodium flowed against the gravity force, and this indicates that the liquid sodium entrainment caused by vapor counter-flow, the speed of which was about 80 m/s, took place.

УДК 621.039.517

The Intensification of Mass Transfer in LWR Rods Bundles by Cellular Mixing Grids \P.V. Markov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 9 pages, 4 tables, 5 illustrations. – References, 6 titles.

The CFD-models of 7-rods and 19-rods bundle with mixing grid was developed. The flow field in rods bundles was investigated. A series of CFD analyses were performed to obtain hydraulic and mixing properties of mixing cellular grids.