

УДК 620.179.44(088.8)

Токовихревой метод контроля течи воды (пара) в жидкометаллический теплоноситель

ТИПИКИН В. Н.

Опыт эксплуатации установки с быстрым реактором БН-350 в течение 1972—1975 гг. [1] показал необходимость создания быстродействующих систем контроля протечек воды в натрий. Для этой цели может быть применена система, основанная на измерении электропроводности натрия методом вихревых токов. С помощью катушек возбуждения, питаемых переменным током, в контролируемом участке трубопровода с жидким металлом наводят вихревые токи, величина которых зависит от электропроводности контролируемого участка, связанной, в свою очередь, с наличием в нем несплошностей (пузырей и т. п.). О величине вихревых токов, а следовательно, и количестве пузырей, судят по изменению тока в возбуждающей катушке или ЭДС в специальных измерительных обмотках.

По опубликованным данным этот метод широко применяется за рубежом на исследовательских установках для обнаружения проникновения газа или пара в жидкий металл и может быть использован на промышленных установках [2—7]. Применение приборов этого типа ограничено значительной зависимостью сигнала датчика от температуры теплоносителя и самих обмоток. Сигнал токовихревого датчика, вызванный изменением температуры, может быть соизмерим с величиной полезного сигнала, возникающего при прохождении по контролируемому участку трубопровода пузырьков газа или пара при реальных течах. На величину сигнала датчика влияют изменение электрического сопротивления рабочей обмотки, электропроводности контролируемого жидкого металла, а также и индивидуальности рабочей обмотки; последнее связано с температурным изменением ее геометрических размеров. Предварительные эксперименты показали, что 60% суммарной температурной погрешности вносит изменение индуктивности рабочей обмотки (вызванное температурным изменением ее геометрических размеров), 30% — изменение ее активного сопротивления и 10% — изменение электропроводности контролируемого жидкого металла.

В настоящей работе приведены некоторые результаты испытаний токовихревых датчиков накладного и проходного типов, разработанных автором в 1969—1972 гг. для контроля сплошности потоков жидкометаллических теплоносителей [8, 9]. Датчики состоят из рабочей (индуктивной) и компенсационной секций. Термокомпенсационная секция выполнена бифилярной катушкой с активным сопротивлением, равным активному сопротивлению рабочей секции. Обе секции расположены в общем корпусе, геометрически идентичны, находятся в одинаковых температурных условиях и включены в смежные плечи моста переменного тока. К одной из диагоналей моста подключен генератор, а ко второй — измерительный прибор. Дополнительные элементы схемы моста рассчитаны так, что при любом изменении температуры обмоток полные сопротивления смежных плеч (по модулю и по фазе) равны.

Прибор испытывали на жидкометаллических стендах с натриевым теплоносителем при вводе в контур аргона, воды и водяного пара при температуре теплоносителя 300—450°С. Расход металла измеряли магнитными расходомерами, расход газа (пара) — дроссельной шайбой. На стендах была предусмотрена сепарация газа (пара), введенного в контур.

В качестве вторичного прибора использовали серийный прибор ИД-2И, предназначенный для работы в комплекте с индуктивными датчиками давления дифференциально-трансформаторного типа. Запись сигнала производилась самонапряженным потенциометром РСН-4.

Испытания продемонстрировали высокую чувствительность датчиков (~ 7 мВ/1% газа без усиления), хорошую повторяемость результатов и надежность регистрации искусственных течей пара. Инерционность прибора определяется временем транспортировки от места течи до места установки датчика. Постоянная времени самого датчика составляет несколько миллисекунд. На одном из стендов датчик в течение 2,5 лет наработал в общей сложности более 4 тыс. ч. Прибор использовали также для контроля сепарации пара из жидкометаллического контура и для испытания различных сепарирующих устройств.

Аналогичный прибор с начала 1977 г. применяется для контроля заполнения трубопровода натрием. Он установлен на дренажной линии пробоотборника экспериментального реактора БР-10. В качестве вторичного прибора при отборе проб натрия используется разработанный в ФЭИ индукционный индикатор натрия (ИНИ-3), снабженный дистанционной звуковой и световой сигнализацией. Зависимость величины сигнала от газосодержания имеет линейный характер.

Таким образом, измеряя электропроводность токовихревым методом, можно определять объемное газосодержание в жидком металле (при условии поддержания постоянной температуры контролируемой среды). Для устранения температурной зависимости, вызванной изменением индуктивности рабочей обмотки, сопровождающимся температурным изменением ее геометрических размеров, были разработаны конструкции датчиков, в которых такая зависимость практически сведена к нулю. Это достигалось тем, что обе секции обмотки датчика (рабочая и компенсационная) были выполнены индуктивными и совершенно идентичными по своим геометрическим размерам и электрическим параметрам и находились в одинаковых температурных условиях. Индуктивная связь компенсационной обмотки с потоком теплоносителя была устранена за счет различных дополнительных конструктивных элементов.

При испытаниях с натрием на холодных ампулах диаметром 32 мм с вваренными в них полыми стаканчиками, имитирующими пузырьки газа, было установлено, что надежно можно обнаруживать пузырьки газа или пара диаметром 2—3 мм. Сигнал на выходе усилителя при пузырьке диаметром 3 мм составлял ~ 250 мВ при измерении ламповым вольтметром. Очевидно, что возможно обнаружение и более мелких пузырьков, например диаметром 1 мм. По данным работы [6], были обнаружены пузырьки газа диаметром 0,38—0,62 мм при свободном всплытии их в неподвижном теплоносителе. При этом оговорено, что при диаметре пузырька 0,1 мм сигнал на выходе прибора составил бы около 10 мВ, что согласуется с нашими данными. Нами были разработаны и испытаны датчики проходного типа на трубопроводах диаметром 40×1 ; 32×3 ; 48×4 ; 75×5 и 300×12 мм и накладного типа для трубопроводов диаметром 32×3 ; 75×5 и 108×7 мм индуктивностью от 2 до 200 мГ, с магнитопроводом и без него.

Испытания датчика для трубопроводов диаметром 300×12 мм проводили на макете, представляющем собой вертикально расположенный, заглушенный снизу отрезок трубы, на который был установлен датчик проходного типа. В качестве контролируемой среды использовался сплав Вуда. Имитаторы несплошностей — полые немагнитные ампулы — вводили в расплав через специальную дистанционирующую решетку в верхней части макета.

Имитируемое газосодержание изменялось от 0 до 10%. Вторичный прибор — преобразователь ПТДТ-Л, предназначенный для работы с индукционными дифференциально-трансформаторными датчиками давления.

Испытания показали принципиальную возможность применения токовых датчиков проходного типа на трубопроводах больших диаметров с толщиной стенки 10—15 мм. Оказалось, что чувствительность к глубоко расположенным несплошностям понижается вследствие уменьшающейся по экспоненте от поверхности к центру трубы плотности вихревых токов. Чувствительность прибора в начальной части шкалы (при газосодержаниях порядка 1—3%) равна 60 мВ на 1% газа в полости катушки.

Один из разработанных в ФЭИ вторичных приборов был выполнен с трансформаторным входом на основе двойной мостовой фазочувствительной схемы с включением нуля-органа на равновесие напряжения (схема Грэтца) [10]. Прибор содержал также стабилизированный генератор переменного напряжения и усилитель мощности. К выходу прибора подключали самопишущий потенциометр КСП-4. Настройку осуществляли таким образом, чтобы максимальная отметка шкалы (10 мкВ) встроенного микроамперметра и самопишущего потенциометра (10 мВ) соответствовала объемному газосодержанию $\varphi = 10\%$.

В экспериментах надежно фиксировали течи воды, составляющие в пересчете на объемное газосодержание по водороду от 0,15 до 5% при температуре теплоносителя 300—350°С. При 400—450°С величина сигнала резко уменьшалась. Пульсации сигнала, связанные с прохождением через датчик пузырьков водорода (выделяющегося при взаимодействии воды с натрием) ослаблялись примерно на порядок, а в ряде случаев отсутствовали совсем. Водород, по-видимому, при такой температуре успевал полностью раствориться за время прохождения его по контуру от места введения газа до датчика. Однако прибор при этом регистрировал увеличение сигнала до 2—5 мВ за счет изменения электропроводности, обусловленного появлением в натрии водородсодержащих примесей. В некоторых экспериментах при кратковременных подачах воды (пара) увеличение показаний прибора приводило к быстрому (в течение нескольких секунд) зашкаливанию прибора и медленному (в течение нескольких минут)

возвращению стрелки прибора в исходное состояние по мере уменьшения примесей в процессе работы холодных ловушек.

При 300—350°С прибор четко фиксировал момент образования течи пара (с учетом времени транспортировки его до датчика) и показал хорошую повторяемость результатов при одинаковых газосодержаниях. Тем не менее значительная температурная зависимость при контроле малых долей процента в пересчете на объемное газосодержание) требуют дальнейшего усовершенствования прибора.

В настоящее время в ФЭИ проводятся испытания токовых датчиков с улучшенной термокомпенсацией, отрабатываются конструкции датчиков накладного и разъемного типов, с магнитопроводом и без него, ведутся работы по уменьшению их габаритов и усовершенствованию и отработке схем вторичных приборов. Предварительные результаты испытаний позволяют надеяться на возможность создания сигнализатора течи водяного пара в натрий, свободного от температурной зависимости, с чувствительностью, позволяющей надежно фиксировать течи в десятые и сотые доли процента по объемному газосодержанию (по водороду).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казачковский О. Д. и др. «Атомная энергия», 1977, т. 43, вып. 5, с. 343.
2. Патент США № 3529234, кл. 324-5, 1970.
3. Патент Великобритании № 1316793, кл. G4S, 1973.
4. Патент Франции № 1598425, кл. 21с, 15/00, 1967.
5. Патент Франции № 2136712, кл. C21с, 17/00, 1973.
6. Uffmann H. «Kernenergie», 1974, v. 17, N 1, p. 5.
7. Патент ФРГ № 1228831, кл. 42, 3/53, 1960.
8. Тишкин В. Н., Лешков В. В. Препринт ФЭИ-840. Обнинск, 1978.
9. Тишкин В. Н. «Бюл. изобрет.» 1978, № 43, с. 147; № 46, с. 116.
10. Измерительные преобразователи с аналоговым выходом электрических величин. Сб. статей. М., изд. Онтиприбор, 1966.

Поступило в Редакцию 08.01.79
В окончательной редакции 16.03.79

УДК 621.039.517.5

Распределение температуры в топливном сердечнике и оболочке при лучистом теплообмене между ними

КУЗНЕЦОВ В. Ф.

В работах [1, 2] исследовано радиально-азимутальное энергораспределение в толстом блоке гетерогенного реактора (ρ , φ -геометрия). В настоящей работе, являющейся развитием работы [3], проводится анализ так называемой точкой структуры температурного поля в поперечном сечении твэла, обусловленной неравномерностью энергораспределения.

Рассматривается случай, когда топливный сердечник V_1 и оболочка V_2 разделены вакуумным зазором (теплообмен по закону Стефана — Больцмана по поверхностям S_1 и S_2), а теплообмен с наружной поверхности оболочки S_3 осуществляется по заданному нелинейному закону. Расчет поля температуры $T(r)$, $r = \{\rho, \varphi\}$ (система координат связана с центром твэла) в этом случае сводится к решению краевых задач:

$$\nabla \lambda(r) \nabla T(r) = -q_v(r), \quad r \in V_1;$$

$$-\lambda(r_s) \frac{\partial T(r_s)}{\partial n_s} = f[T(r_s), T(r'_s)], \quad r_s \in S_1, \quad r'_s \in S_2; \quad (1)$$

$$\nabla \lambda(r) \nabla T(r) = 0, \quad r \in V_2;$$

$$-\lambda(r_s) \frac{\partial T(r_s)}{\partial n_s} = kf[T(r'_s), T(r_s)], \quad r_s \in S_2, \quad r'_s \in S_1; \quad (2)$$

$$-\lambda(r_s) \frac{\partial T(r_s)}{\partial n_s} = g[T(r_s)], \quad r_s \in S_3,$$

где $\partial/\partial n_s$ — производные по внешним нормальям к поверхностям S_l ($l = 1, 2, 3$); $f[T(r_s), T(r'_s)] = \kappa [T(r_s)]^4 - T(r'_s)^4$; $\kappa = \sigma - \sigma \epsilon_{\text{пр}}$; σ — постоянная Стефана — Больцмана; $\epsilon_{\text{пр}} = \epsilon [T(r_s), T(r'_s)]$ — приведенная степень черноты поверхностей S_1 и S_2 ; $g[T(r_s)] = \sum_{p=0}^m F_p T(r_s)^p$ — заданная, нелинейная (при $m \geq 2$) функция; k — отношение