

4. Свойства конструкционных материалов на основе углерода. Справочник под ред. В. П. Соседова. М., Металлургия, 1975.
5. Графит как высокотемпературный материал. Под ред. К. П. Власова. М., «Мир», 1964.
6. Гончаров В. В. и др. Действие облучения на графит ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1978.
7. Калягина И. П., Виргильев Ю. С. «Атомная энергия», 1977, т. 43, вып. 2, с. 106.
8. Платонов П. А., Чугунов О. К. и др. Препринт ИАЭ-2247. М., 1972; препринт ИАЭ-2266. М., 1973.
9. Шуршакова Т. Н., Виргильев Ю. С., Калягина И. П. «Атомная энергия», 1976, т. 40, вып. 5, с. 399.
10. Абдусаламов Н. и др. В кн.: Сб. докл. Всесоюз. школы по внутриреакторным методам исследований. Димитровград, изд. НИИАР, 1978, с. 388.

УДК 681.128

## Электромагнитный преобразователь расхода жидкого металла в тепловыделяющих сборках

КОРНИЛОВ В. П., ЛОГИНОВ Н. И.

При исследовании гидродинамики и теплообмена в моделях активной зоны реакторов требуется измерить расход в ячейках решетки ТВС. С помощью устройства, описанного в [1], расход в ячейках, примыкающих к данному твэлу, можно определить поочередно. Для этого надо поворачивать твэл с преобразователем вокруг оси. Существенным недостатком преобразователя является также зависимость его выходного сигнала от расхода не только в данной ячейке, но и в соседних. Учесть вклад в выходной сигнал соседних ячеек затруднительно, особенно в нестационарном режиме. Преобразователь с медным кольцом, шунтирующий индуцированное напряжение в смежных ячейках [2], позволяет исключить влияние смежных ячеек, что дает возмож-

ность измерять азимутальное распределение скорости в ячейках поворачиванием твэла с преобразователем вокруг оси. Использовать такой преобразователь для измерения расхода по ячейкам в нестационарных режимах нельзя.

Для одновременного измерения расхода в нескольких ячейках предложен преобразователь (рис. 1) с многополюсным магнитом [3]. Магнитная система имеет чередующуюся полярность, число полюсов выбирается равным числу ячеек, примыкающих к твэлу, в котором установлен преобразователь. Электроды приварены к стенке между полюсами магнитной системы. Их концы выведены за пределы экспериментального участка и подключены к вторичному прибору. Жидкость при движении в пространстве между твэлами взаимодействует с магнитным полем, и между каждыми двумя соседними электродами возникает разность потенциалов, связанная однозначной зависимостью с расходом в соответствующей ячейке. Судить о значениях расхода в каждой ячейке в любой момент времени можно по одновременной регистрации сигналов с каждой пары электродов.

При использовании такого преобразователя можно учесть взаимное влияние соседних ячеек и получить истинную картину распределения расхода по ячейкам. В связи с тем, что аналитическое решение задачи для данной геометрии получить весьма трудно, рассмотрим эквивалентную электрическую схему преобразователя (рис. 2). Здесь  $E_1 - E_6$  — э. д. с., индуцируемая в жидкости в соответствующих ячейках и пропорциональная расходу в них;  $r_1 - r_6$  — внутреннее сопротивление источников э. д. с., т. е. жидкого металла;  $R_1 - R_6$  — сопротивление нагрузки, т. е. стенок преобразователя и примыкающих твэлов, шунтирующее э. д. с.,  $U_1 - U_2$  — измеряемое напряжение; э. д. с., индуцируемая в данной ячейке, пропорциональна расходу и магнитной индукции в ней, т. е.  $E_i = k B_i Q_i$ . Если геометрические размеры ячеек, а также магнитная индукция в них одинаковы, то коэффициент  $k$  одинаков для всех ячеек. Его значение можно определить градуировкой, если измерить суммарный расход через пучок (например, в подводящем трубопроводе) и сопоставить его с э. д. с. всех ячеек. Тогда, чтобы получить численные значения расхода в каждой ячейке, достаточно знать индуцированную э. д. с.

Составив и решив систему уравнений Кирхгофа для эквивалентной схемы, можно определить связь изме-

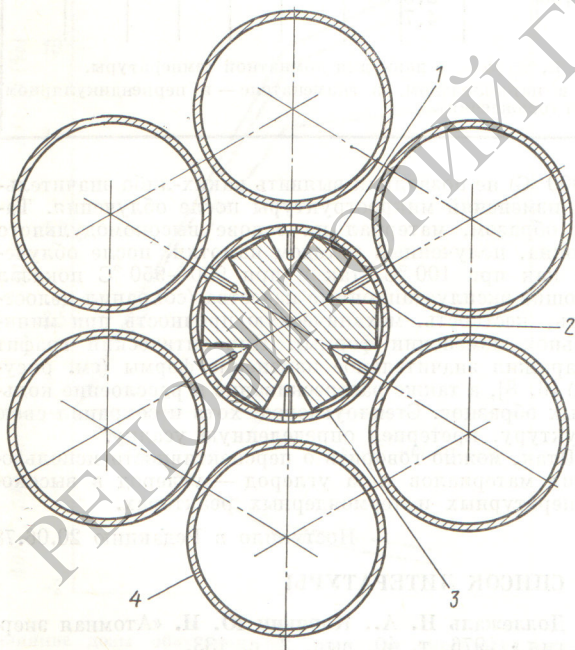


Рис. 1. Схематическое устройство преобразователя:

1 — магнитная система; 2 — электрод; 3 — оболочка макета твэла; 4 — соседние твэлы

прямого напряжения  $U_1 - U_6$  с искомой э. д. с.:

$$E_i = U_i (1 + R_i/r_i) + \frac{(-1)^i R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \sum_{i=1}^n (-1)^{i-1} U_i (R_i/r_i). \quad (1)$$

Эта формула справедлива для любого четного значения  $n$ . Так как при выводе формулы не было ограничений относительно  $R_i$  и  $r_i$ , то она справедлива и для ячеек разной формы.

Преобразователь предназначен главным образом для измерений расхода в пучках с одинаковыми ячейками, т. е. его можно использовать во всех ячейках, кроме периферийных. Если ячейки пучка одинаковы, то  $R_1 = R_2 = \dots R_6$ ;  $r_1 = r_2 = \dots r_6$ ;  $R_i/r_i = R/r$ ;

$$R_6 / \sum_{i=1}^6 R_i = 1/6;$$

$$E_i = U_i (1 + R/r) + \frac{(-1)^i R}{6r} \sum_{i=1}^6 (-1)^{i-1} U_i. \quad (2)$$

По этой методике решения задачи невозможно вычислить значения  $R_i$  и  $r_i$  или их отношения на основании известных геометрических размеров ячеек и физических свойств жидкости и стенки. Поэтому преобразователь нуждается в градуировке.

Расход через ячейку можно выразить так:

$$Q_i = E_i / k B_i = \frac{U_i}{k B_i} (1 + R/r) + \frac{(-1)^i R}{6 k B_i r} \sum_{i=1}^6 (-1)^{i-1} U_i = c_1 U_i + c_2 \sum_{i=1}^6 (-1)^{i-1} U_i. \quad (3)$$

Константы  $c_1$  и  $c_2$  определяются в процессе градуировки. Для этого измеряется общий расход через пучок, все ячейки которого одинаковы, и приравнивается к сумме расходов по отдельным ячейкам:

$$Q_{\text{общ}} = \sum Q_i = c_1 \sum_{i=1}^n U_i + c_2 \sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^6 (-1)^{i-1} U_i \quad (4)$$

Так как градуируют преобразователь при нескольких значениях общего расхода, то, выбрав два из них, можно получить с использованием формулы (4) систему двух уравнений с двумя неизвестными  $c_1$  и  $c_2$  и вычислить их. Подставив значения  $c_1$  и  $c_2$  в формулу (3), можно определить расход через любую ячейку.

Рассмотренный преобразователь с многополюсными магнитами можно применять для измерения расхода в трубопроводах большого диаметра. Преобразователи с цилиндрическим магнитом [4], используемые для этих целей, дают достоверные результаты только в неискаженном осесимметричном потоке, так как расход определяется по известному (например, логарифмическому) профилю скорости. Однако истинный профиль скорости в трубопроводе, как правило, неизвестен. Преобразователь с многополюсным магнитом позволит определить, является ли поток осесимметричным. Если он окажется таковым, то отпадут сомнения в достоверности результатов. В противном случае преобразователь даст возможность оценить степень несимметрии потока и возможную погрешность измерения.

Когда преобразователь с многополюсным магнитом находится в круглом трубопроводе, задача поддается

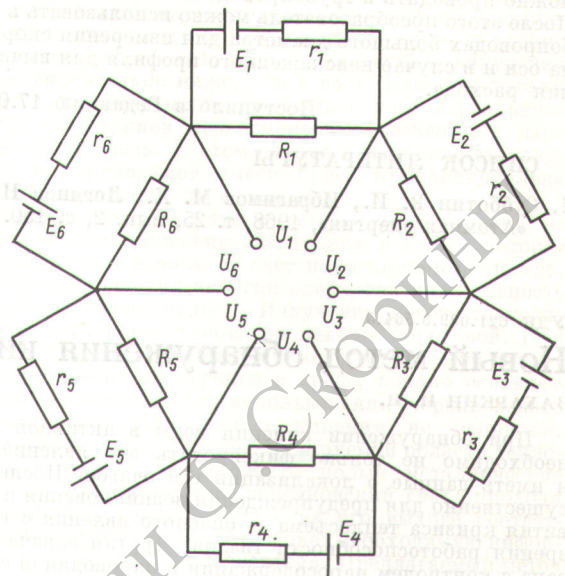


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема преобразователя

аналитическому решению. В двумерном приближении, т. е. предполагая, что магнитное поле распространяется вдоль оси трубы достаточно далеко, можно получить распределение потенциалов в жидкости и в стенке преобразователя, а также и его выходное напряжение. Разность потенциалов между двумя соседними электродами преобразователя находится по формуле

$$\Delta U_w = 2/3 B_m \frac{r_0^{n/2+1} (1 + R_0^n) R_0^{-n/2}}{ac - bd (R/R_1)^n} \int_R^{R_1} \frac{W(r)}{r^{n+1}} dr. \quad (5)$$

Если рассматривается задача о 6-полюсном преобразователе, то в знаменателе подынтегрального выражения радиус в седьмой степени и значение интеграла определяется главным образом областью потока около преобразователя. Профиль скорости в центральной части трубопровода довольно плоский и  $W(r) \simeq W_0 = \text{const}$ . Тогда при  $n = 6$

$$\Delta U_w = 2/3 B_m W_0 R_0 \frac{cr_0^4 R_0^2/R_1^6}{ac - bd R_0^2/R_1^6} (1 - R_0^6/R_1^6). \quad (6)$$

Так как  $R/R_1$  обычно имеет значение  $\sim 0,1$ , то этим отношением в шестой степени можно пренебречь:

$$\Delta U_w = \frac{2}{3} B_m W_0 R_0 [(r_0^4 R_0^2/R_1^6)/a], \quad (7)$$

где

$$a = (1 + R_0^n/R_1^n) + (\sigma_w/\sigma_f) (1 - R_0^n/R_1^n);$$

$B_m$  — максимальное значение магнитной индукции на поверхности полюса магнита;  $\sigma_w$ ,  $\sigma_f$  — электропроводность стенки и жидкости. Формула (7) и является принципиальной основой для измерения скорости (и расхода) в трубопроводе.

Для использования преобразователь должен быть проградуирован. Так как прибор чувствителен лишь к скорости в прилегающей к нему области, то градуировку, в процессе которой устанавливается зависимость между выходным напряжением и скоростью жидкости,

можно проводить в трубопроводе небольшого диаметра. После этого преобразователь можно использовать в трубопроводах большого диаметра для измерения скорости на оси и в случае неискаженного профиля для вычисления расхода.

Поступило в Редакцию 17.07.78

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Субботин В. И., Ибрагимов М. Х., Логинов Н. И. «Атомная энергия», 1968, т. 25, вып. 2, с. 150.

2. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках. (Авт.: Субботин В. И., Ибрагимов М. Х., Ушаков П. А., Бобков В. П., Жуков А. В., Юрьев Ю. С.). М., Атомиздат, 1975.

3. Логинов Н. И. Авт. свид. № 444938. Бюл. «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», 1974, № 36, с. 91.

4. Логинов Н. И. «Магнитная гидродинамика», 1971, № 2, с. 128.

УДК 621.039.5.564.5

## Новый метод обнаружения кипения воды в реакторе

ЗАХАРКИН И. И.

При обнаружении кипения воды в активной зоне необходимо не только фиксировать это явление, но и иметь данные о локализации его очагов. Последнее существенно для предупреждения возникновения и развития кризиса теплосъема — опасного явления с точки зрения работоспособности твэлов. Другая задача связана с контролем паросодержания в пароводяной смеси на выходе из активной зоны. Кипение обнаруживают ультразвуковым методом, электрическим, оптическим и другими, основанными на статистическом анализе шумов мощности реактора. Автором предложен оптический метод с использованием эффекта черенковского свечения электронов в воде\*.

Известно, что заряженная частица, движущаяся в диэлектрической среде со скоростью, превышающей фазовую скорость света в этой среде, испускает электромагнитное черенковское излучение. Оно распространяется под углом  $\theta$  к направлению ее траектории, причем выполняется соотношение

$$\cos \theta = 1/n(\nu) \beta,$$

где  $\beta = v/c$  — скорость частицы в единицах скорости света;  $n(\nu)$  — зависящий от частоты  $\nu$  показатель преломления среды.

Интенсивность излучения в области видимого света определяется выражением

$$I = 450 \sin^2 \theta \text{ фотон/см.} \quad (1)$$

Черенковский эффект имеет пороговый характер, и излучение возникает при условии  $\beta_t > 1/n(\nu)$ . Предельный угол свечения достигается при  $\beta = 1$ . В этом случае  $(\cos \theta)_1 = 1/n(\nu)$ . Пороговая кинетическая энергия частицы  $E_t^k$  связана с показателем преломления соотношением

$$E_t^k = m_0 c^2 \left\{ \frac{n(\nu)}{[n^2(\nu) - 1]^{1/2}} - 1 \right\}, \quad (2)$$

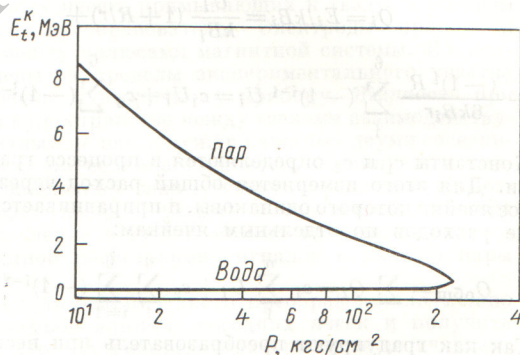
где  $m_0 c^2$  — энергия покоя (0,51 МэВ для электрона). Таким образом, пороговая энергия черенковского свечения для данного вида частиц определяется показателем преломления среды.

В водяном теплоносителе докритических параметров плотность жидкой фазы (воды) выше, чем газовой (пара). Показатель преломления для каждой фазы

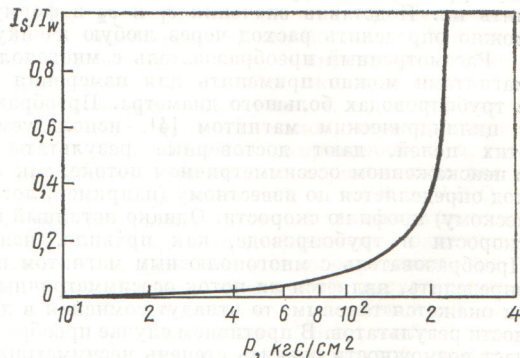
находится по формуле Лорентц — Лоренца

$$n(\nu) = [W + 2\rho A(\nu)/W - \rho A(\nu)]^{1/2}, \quad (3)$$

где  $W$  — молекулярная масса среды;  $\rho$  — плотность среды;  $A(\nu)$  — молекулярная рефракция ( $A(\nu) = 3,7$  для Р-линии натрия). Вследствие различия плотностей показатель преломления воды выше, чем пара. Следовательно, пороговая энергия свечения электронов  $E_t^k$  в воде ниже, чем в паре. Из приведенной на рис. 1 зависимости, которая получена по формулам (2) и (3), следует, что  $E_t^k$  для воды незначительно зависит от



Р и с. 1. Пороговая кинетическая энергия электронов для воды и пара на линии насыщения



Р и с. 2. Отношение интенсивностей излучения в паре и воде на линии насыщения для электронов с  $\beta = 1$

\* Захаркин И. И. Авт. свид. № 448770. Бюл. «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», 1974, № 40, с. 143.