

$$\left. \begin{aligned}
 & \int_0^\pi [\Phi_{13} - \Phi_{12} - \Phi_{14}]_{\rho_1} \cos(k\omega) d\omega = 0, \\
 & \int_0^\pi \left[\frac{\partial}{\partial \rho} (\Phi_{13} - \Phi_{12} - \Phi_{14}) \right]_{\rho_1} \cos(k\omega) d\omega = 0, \\
 & \int_0^{\omega_0} \left[\frac{\partial \Phi_{23}}{\partial \rho} + \gamma \Phi_{23} \right]_{\rho_1} \cos(k\omega) d\omega + \\
 & + \int_0^{\omega_0} \left[\frac{\partial}{\partial \rho} (\Phi_{23} - \Phi_{22} - \Phi_{24}) \right]_{\rho_1} \cos(k\omega) d\omega = 0, \\
 & \int_0^{\omega_0} \left[\frac{\partial}{\partial \rho} (\Phi_{22} + \Phi_{24}) - \gamma (\Phi_{22} + \Phi_{24}) \right]_{\rho_1} \times \\
 & \times \cos(k\omega) d\omega + \int_0^{\omega_0} [\Phi_{23} - \Phi_{22} - \Phi_{24}]_{\rho_1} \times \\
 & \times \cos(k\omega) d\omega = 0,
 \end{aligned} \right\} (14)$$

а уравнения, которые получаются из условий на сторонах сектора AOB , проектируем на последовательность $[r^{2k+1}]$

$$\int_{R_1}^{R_2} \frac{\partial \Phi_{i4}}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=\pi/N} r^{2k+1} dr = 0. \quad (15)$$

Измерение скорости и температуры жидкометаллического теплоносителя

В. И. СУББОТИН, М. Х. ИБРАГИМОВ, Н. И. ЛОГИНОВ

УДК 621.039.534

Исследование гидродинамических характеристик сложных каналов, имитирующих активную зону реакторов с жидкометаллическим охлаждением, имеет очень важное значение. Так как подогрев теплоносителя в реакторе большой, то неравномерное распределение расхода жидкого металла по сечению реактора может привести к недопустимой температуре твэлов. Для контроля за этим как в лабораторных условиях на моделях активной зоны, так и на действующих реакторах нужны датчики для одновременного измерения скорости и температуры теплоносителя. По нашему мнению, наиболее перспективным является электромагнитный метод измерения скорости в сочетании с использованием микротермопар. Для обоснования этого метода были разработаны малогабаритные магнитные расходомеры для жидкого металла и проведены эксперименты.

¹ Л. В. Канторович, В. И. Крылов. Приближенные методы высшего анализа. М., Гостехтеориздат, 1949.

Соотношениями (13)–(15) определена бесконечная система алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов A_{ijk} , B_{ijk} . Если эту систему ограничить, то в силу регулярности рядов (10)–(12) ограниченная система имеет решения¹. Ее решениями будут приближенные значения коэффициентов в выражениях для потоков нейтронов (10)–(12). Определитель ограниченной алгебраической системы можно рассматривать как приближенное уравнение критичности.

При оценке целесообразности практического использования предлагаемого метода нужно заметить, что с его помощью решаются без всякого моделирования задачи диффузии для многосвязных составных областей, а их решения получаются в виде сильно сходящихся регулярных рядов. Следовательно, ограничиваясь тремя-четырьмя первыми слагаемыми в рядах (10)–(12), можно добиться необходимой точности при вычислении эффективного коэффициента размножения нейтронов и распределения потоков нейтронов по реактору.

Кроме того, необходимо отметить, что алгоритм задачи включает в себя простые операции вычисления тригонометрических функций и функций Бесселя с определенными значениями аргументов, поэтому реализация этого алгоритма проста для ЭВМ.

Если сравнивать предлагаемый метод с методом сеток, который в настоящее время широко используется при расчетах реакторов, то следует заметить, что автору неизвестны работы, в которых методом сеток решались бы краевые задачи для многосвязных областей с незамкнутыми границами.

В заключение автор выражает признательность В. В. Смелову и Г. Я. Румянцеву за критические замечания при обсуждении данной работы.

Поступило в Редакцию 27/IV 1967 г.
В окончательной редакции 14/XII 1967 г.

Конструкция малогабаритного расходомера аналогична описанной ранее², однако размеры магнита, помещенного в трубку, значительно меньше. Изменено расположение магнита, ось которого расположена по диаметру трубки перпендикулярно движению теплоносителя. Сигнал снимается электродами, приваренными к стенкам трубки.

Одной из первых задач было измерение расхода теплоносителя в концентричном кольцевом зазоре. Датчик был отградуирован объемным методом на лабораторном жидкометаллическом стенде. Зависимость выходного сигнала датчика от скорости линейная, чувствительность составляла более 100 мкв на 1 м/сек. Один из датчиков успешно работает в настоящее время на полупромышленной установке.

Следующий этап — измерение распределения скорости по сечению канала некруглой формы.

На рис. 1 показано изменение сигнала датчика в зависимости от угла поворота в эксцентричном кольце-

² Сб. «Жидкие металлы». М., Атомиздат, 1967, стр. 402.

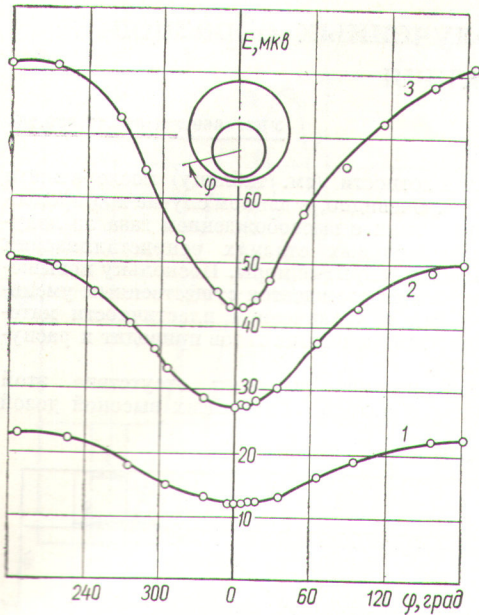


Рис. 1. Изменение сигнала датчика в эксцентричном кольцевом зазоре:

1 — при расходе теплоносителя $2,05 \text{ м}^3/\text{ч}$;
2 — при расходе $4,07 \text{ м}^3/\text{ч}$; 3 — при расходе $5,75 \text{ м}^3/\text{ч}$.

вом зазоре. Как следует из рисунка, величина сигнала датчика плавно убывает по мере перемещения электродов от широкой части кольцевого зазора к узкой. Абсолютная величина сигнала изменяется пропорционально средней скорости теплоносителя в канале.

На рис. 2 приведены результаты измерения электромагнитным датчиком распределения расхода натрия по углу вокруг стержня, установленного вблизи обечайки. Как и в предыдущем случае, величина сигнала пропорциональна средней скорости теплоносителя через весь пучок стержней. Распределение же сигнала по углу достаточно точно отражает гидродинамику потока в таком сложном канале. Наблюдается снижение и увеличение сигнала соответственно в узких и широких частях канала.

Изменение величины сигнала электромагнитного датчика дает качественную картину распределения расхода по сечению канала; во многих случаях знание даже относительного распределения скорости теплоносителя является весьма полезным. Для перевода показаний датчика в количественные зависимости распределения скорости теплоносителя по сечению канала нужна специальная градуировка датчика. Большую помощь в нахождении связи между распределением потенциалов и скоростей может оказать решение уравнений магнитной гидродинамики для исследуемого канала.

Использование электромагнитного метода измерения скоростей не вносит никаких гидродинамических возму-

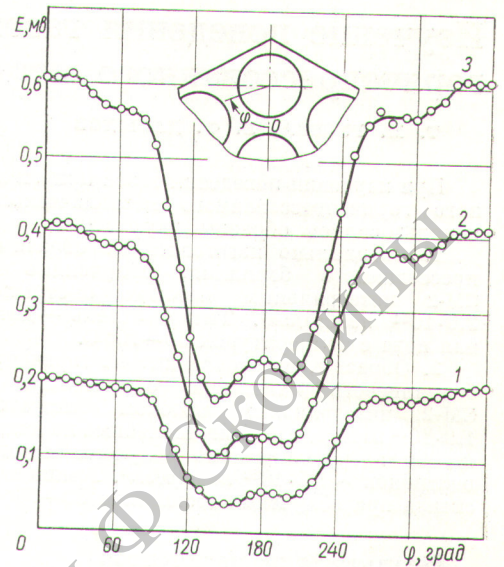


Рис. 2. Изменение сигнала датчика, установленного в пучке стержней:

1 — средняя скорость теплоносителя $1,98 \text{ м/сек}$;
2 — средняя скорость $3,96 \text{ м/сек}$; 3 — средняя скорость $5,9 \text{ м/сек}$.

щений в сечение канала. Это делает такой метод особенно ценным при исследовании сложных каналов с малым гидравлическим диаметром (например, пучков стержней в обечайке, эксцентричных кольцевых зазоров и т. п.), когда очень трудно применить другие методы измерения скорости теплоносителя (например, пневмометрические трубки, термоанемометры). Безынерционность электромагнитного метода позволяет исследовать пульсационные характеристики потока, а также нестационарные режимы течения.

Весьма перспективна возможность одновременного измерения гидродинамических и тепловых характеристик канала. Для этого в электромагнитном датчике вместо каждого электрода устанавливаются микротермомпары, с помощью которых измеряется уровень температур в канале. В этом случае измерение сигнала, соответствующего скорости жидкого металла, проводится между одноименными электродами термомпар.

Рассмотренные выше датчики имеют весьма простую и достаточно надежную конструкцию, позволяющую использовать их не только в лабораторной практике, но и на действующих реакторах с жидкометаллическим теплоносителем.

В проведении экспериментов, результаты которых приведены на рис. 1 и 2, принимали участие А. В. Жуков и А. К. Паповянец.

Поступило в Редакцию 24/XI 1967 г.