

УДК 621. 039. 564

## Измерение расхода методом корреляции случайных сигналов термопар в контурах с естественной циркуляцией теплоносителя

СЕЛИВАНОВ В. М., МАРТЫНОВ А. Д., СЕРГЕЕВ Ю. А., СЕВЕРЬЯНОВ В. С., СОЛОПОВ А. П., ШАРЫПИН В. И. (СССР), ПАЛЛАГИ Д., ХОРАНИ Ш., ХАРГИТАИ Т., ТЁЖЕР Ш. (ВНР)

Контроль расхода теплоносителя является сложной задачей, если для отвода тепла из активной зоны используется естественная циркуляция однофазной жидкости [1], так как располагаемый полезный напор в этом случае измеряется десятками миллиметров водяного столба.

Применительно к естественной циркуляции заслуживают внимание методы с использованием расходомеров, в которых отсутствует сужение потока (тахометрические и корреляционные). Опыт эксплуатации расходомеров турбинного типа показывает их недостаточную надежность и недолговечность. Корреляционные методы измерения расхода, по-видимому, более перспективны [2—5]. Особенно привлекателен метод детектирования флюктуаций температуры теплоносителя, основанный на использовании в качестве датчиков обычных термопар. Бесспорным преимуществом корреляционных расходомеров являются надежность (ввиду отсутствия движущихся частей), минимум потерь напора и возможность получения информации из собственного шума технологического процесса.

В настоящей статье рассматриваются вопросы, связанные с практической отработкой метода корреляции случайных сигналов термопар для измерения расхода воды в контурах с естественной циркуляцией (реакторы, стелды). Экспериментально изучалось влияние инерционности термопар (с изоляцией горячего спая и без изоляции); базового расстояния между термопарами (в диапазоне изменения скорости от 0,1 до 1,3 м/с) и местоположения горячих спаев термопар в потоке теплоносителя на результаты корреляционных измерений. Исследования проводили советские (ФЭИ) и венгерские (ЦИФИ) специалисты. Для экспериментов использовались модельно-динамические стенд УКМ [6], канал-петля [7] Первой АЭС со сборкой твэлов для реактора АБВ-1.5 и специальная измерительная аппаратура (ЦИФИ).

**Экспериментальные установки.** Стенд УКМ (рис. 1) представляет собой модель двухконтурной ядерной паропроизводительной установки с естественной циркуляцией однофазного и двухфазного теплоносителей в первом и втором контурах соответственно. Активная зона стенда имитируется четырьмя электрообогреваемыми кассетами. Входы в кассеты выполнены в виде патрубков, внутри которых установлены турбинные датчики расхода с профильными электродами. Парогенератор встроен в корпус первого контура и набран из трубок Фильда. Расход воды во втором контуре контролируется трубами Вентури, смонтированными в опускных трубах.

Экспериментальные измерительные участки первого контура размещались перед входами в кассеты и представляли собой отрезки труб, внутри которых установлены термопары. Использовались кабельные термопары с наружным диаметром оболочки 0,5 и 1,0 мм. Часть термопар с наружным диаметром 0,5 мм имела изолированный горячий спай. Удаленность термопар от входа в участок составляла 2,5—5,0 диаметров

трубы. Относительное удаление спаев термопар от стенки  $y/R$  равно 0,35; 0,5 и 1,0. Различные сочетания термопар позволяли исследовать базовые расстояния

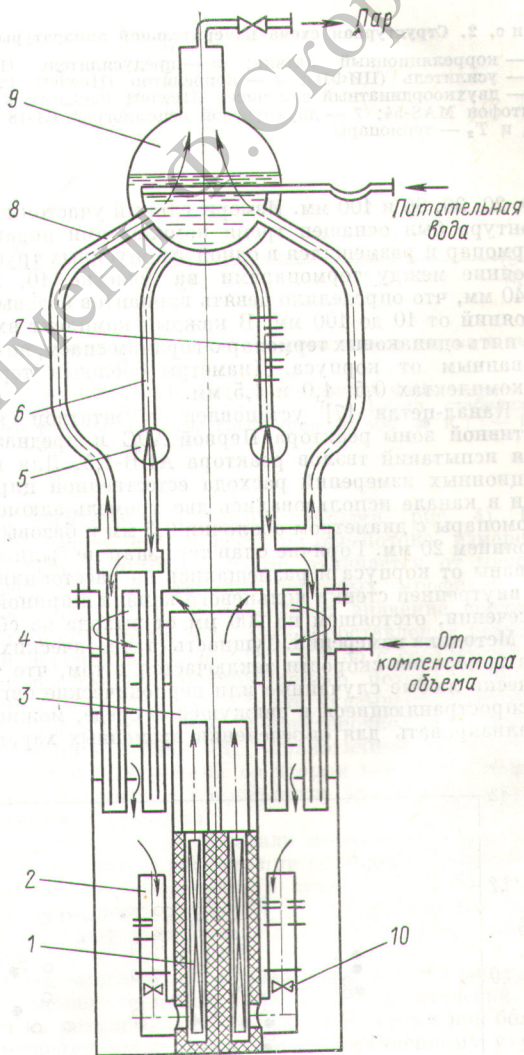


Рис. 1. Принципиальная схема паропроизводительной части стенда УКМ:

1 — активная зона; 2 — экспериментальные измерительные участки первого контура; 3 — подъемная шахта; 4 — парогенератор; 5 — трубы Вентури; 6 — опускные трубы; 7 — экспериментальный измерительный участок второго контура; 8 — подъемные трубы; 9 — барабан-сепаратор; 10 — турбинные расходомеры

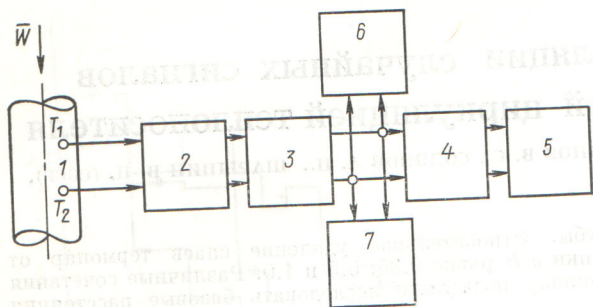


Рис. 2. Структурная схема измерительной аппаратуры:

1 — корреляционный датчик; 2 — предусилитель (ЦИФИ); 3 — усилитель (ЦИФИ); 4 — коррелятор (Hewlett Packard); 5 — двухкоординатный самописец (Hewlett Packard); 6 — магнитофон MAS-54; 7 — двухлучевой осциллограф С1-18 (ФЭИ);  $T_1$  и  $T_2$  — термопары

10, 20, 30, 80 и 100 мм. Измерительный участок второго контура был оснащен тремя комплектами подвижных термопар и размещался в одной из опускных труб. Расстояние между термопарами на участке 10, 20, 30 и 40 мм, что определяло девять вариантов базовых расстояний от 10 до 100 мм. В каждый комплект входило по пять одинаковых термопар с горячим спаем, не изолированным от корпуса. Диаметры оболочек термопар в комплектах 0,5; 1,0 и 1,5 мм.

Канал-петля [7] установлен в штатной ячейке активной зоны реактора Первой АЭС и предназначен для испытаний твэлов реактора АБВ-1,5. Для корреляционных измерений расхода естественной циркуляции в канале использовались две хромель-алюмелевые термопары с диаметром оболочки 0,5 мм и базовым расстоянием 20 мм. Горячие спаи термопар не были изолированы от корпуса и размещались на расстоянии 2 мм от внутренней стенки кольцевого канала шириной 8 мм в сечении, отстоящем на 200 мм от выхода из сборки.

**Методика измерений.** Сущность статистических методов измерения скорости заключается в том, что теоретически любые случайные или периодические сигналы, распространяющиеся в движущейся среде, можно проанализировать для определения временных характери-

стик потока. Такими сигналами в нашем случае были флюктуации температуры теплоносителя.

Измерительная аппаратура (рис. 2) состояла из предусилителя, основного усилителя с фильтром, универсального коррелятора, двухкоординатного самописца и магнитофона для записи сигналов термопар. В установленном режиме в течение определенной отрезка времени сигналы двух термопар, расположенных на расстоянии  $S$  в потоке, после усиления и фильтрации подавались на универсальный коррелятор, который воспроизводил взаимокорреляционную функцию (ВКФ):

$$C_{1-2}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} U_1(t) U_2(t+\tau) dt. \quad (1)$$

По местоположению максимума ВКФ (1) определялись  $\tau_0$  (с) — «пролетное» время (время прохождения случайными сигналами базового расстояния  $S$  между термопарами) и  $W_h$  (м/с) — скорость теплоносителя. Результаты измерений сопоставлялись с теоретическим значением скорости на участке стабилизированного течения и сравнивались со средней скоростью потока, полученной в первом контуре стенда УКМ из данных турбинных расходомеров, во втором контуре из данных трубы Вентури, в канале-петле реактора Первой АЭС из данных теплового баланса. Турбинные расходомеры и труба Вентури тарировались на проливочном стенде. Погрешность тарировочных данных не превышала  $\pm 3\%$ .

**Обсуждение результатов.** Известно [3—5], что вид и амплитуда максимума ВКФ, отражающие характер корреляционных связей сигналов датчиков, зависят от места установки этих датчиков, базового расстояния между ними, от их инерционности и уровня электромагнитных помех.

С учетом сложности взаимосвязей между устойчивостью корреляции сигналов термопар и этими факторами для обобщения опытных данных был принят безразмерный комплекс:

$$K_\tau = \tau_\alpha (\bar{W}/S), \quad (2)$$

представляющий собой отношение постоянной времени термопар  $\tau_\alpha$  к «пролетному» времени  $\tau_0$ , соответствующему средней скорости потока. Благодаря этому комплексу стало возможным представить все результаты, полученные в диапазоне параметров (средняя ско-

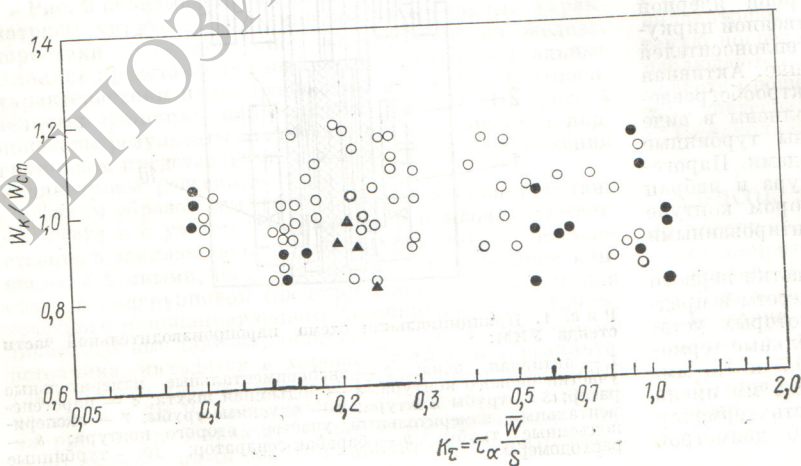


Рис. 3. Обобщенная зависимость результатов измерений от безразмерного комплекса  $K_\tau = \tau_\alpha (\bar{W}/S)$ :

○, ● — измерения в первом и втором контурах стенда УКМ соответственно; ▲ — измерения на выходе из сборки канала-петли

рость  $0,1 \leq \bar{W} \leq 1,35$  м/с; базовое расстояние  $0,01 \leq S \leq 0,1$  м; диаметры оболочек кабельных термопар  $0,5 \leq d_0 \leq 1,5$  мм) в виде одной обобщенной зависимости

$$W_k/W_{ст} = f[\tau_\alpha (\bar{W}/S)], \quad (3)$$

где  $W_k/W_{ст}$  — отношение скорости, измеренной корреляционным методом, к теоретической скорости стабилизированного потока в месте измерения;  $\tau_\alpha$  — инерционность термопар (без изоляции горячего спая от корпуса и с изоляцией), вычисляемая по рекомендациям [8].

Результаты полученных измерений в виде зависимости (3) представлены на рис. 3. Установлено, что в диапазоне комплекса  $0,1 \leq K_\tau \leq 1,1$  между сигналами термопар существует устойчивая корреляционная связь, обеспечивающая возможность измерений скорости статистическим методом. При  $0,1 > K_\tau > 1,1$  получить ВКФ в наших опытах не удалось. Знание области устойчивой корреляции позволяет в исследованном диапазоне параметров выбрать характеристики датчика.

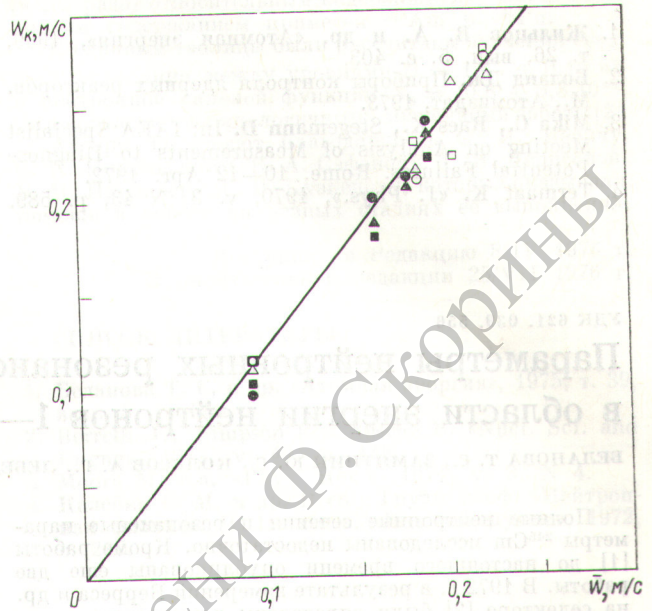
Накопленный опыт и данные работы [4] свидетельствуют о том, что при низком уровне полезного сигнала результаты измерений могут существенно зависеть от электропомех, обусловленных питающей сетью ( $f = 50$  Гц). При измерениях в первом контуре стенда УКМ влияние их было настолько велико, что полученная информация для определения скорости оказывалась иногда недостаточной. Установка на входах измерительные каналы дополнительных фильтров позволяла скомпенсировать влияние фонового шума. При измерениях с помощью термопар с изолированным спаем такая компенсация, как правило, не требовалась. При измерениях в канале-петле проблема борьбы с электропомехами не возникала. Таким образом, следует подчеркнуть, что при корреляционных измерениях скорости в условиях сильных электромагнитных полей электрообогреваемых стендов целесообразно применять термопары со спаем, изолированным от корпуса. При измерениях в реакторных условиях можно использовать также термопары без изоляции горячего спая.

Статистические методы обеспечивают прямое измерение локальной скорости потока между теми точками, в которых установлены чувствительные элементы датчиков. Определение расхода в таком случае не составит труда, если известно соотношение между скоростью в месте измерения и средней скоростью потока. Эти соотношения могут быть достаточно точно вычислены на участке стабилизированного течения теплоносителя, где распределение скорости по радиусу хорошо изучено.

На практике датчики расхода обычно приходится ставить там, где профиль скорости не стабилизирован. При измерениях в активных зонах кассетного типа (например, в реакторе АБВ-1,5 [1]) удобными для установки расходомеров являются входы в кассеты.

Особенности гидродинамики потока на начальном участке гладкой трубы исследовались, в частности, в работе [9], откуда следует, что развитие профилей скорости на этом участке определяется условиями входа и имеет сложный характер. Для трубы с острыми кромками (или при наличии турбулизаторов) максимальное изменение скорости, отмеченное на оси потока, на всей длине участка стабилизации не превышает  $\pm 10\%$ .

Измерения осевых скоростей на нестабилизированном участке течения теплоносителя в нашем случае



Р и с. 4. Результаты измерений скорости на оси потока в первом контуре стенда УКМ:

■, ●, ▲ — участок ЦИФИ; □, ○, △ — участок ФЭИ, — — — теоретические значения скорости при  $y/R = 1,0$  для стабилизированного течения. Базовые расстояния  $S$ , мм: ■ и □ — 10; ● и ○ — 20; △ и ▲ — 30

хорошо согласуется с этими данными (рис. 4). Из рисунка следует, что скорость на оси потока, измеренная корреляционным способом, отличается от максимальной скорости стабилизированных профилей не более чем на  $\pm 10\%$  и превышает значение средней скорости примерно на 20%. При сопоставлении результатов измерений для  $y/R = 0,2$  и  $0,35$  с соответствующей скоростью стабилизированного потока получен больший разброс (до  $\pm 20\%$ ), что указывает, очевидно, на ухудшение корреляции в пристеночной зоне вследствие влияния стенки [3]. Аналогичные результаты получены при измерениях во втором контуре. Данные измерений скорости в канале-петле удовлетворительно согласуются с расчетом.

Результаты опытов показали принципиальную возможность измерения расхода при установке датчиков на участке нестабилизированного течения теплоносителя и целесообразность размещения чувствительных элементов термопар в интервале значений относительного радиуса  $0,25 \leq y/R \leq 1,0$ .

Следует заметить, что абсолютные ошибки в радиальной установке термопар до  $\pm 3$  мм практически не влияют на результаты измерений, в то время как большие смещения могут привести к существенному ухудшению корреляции и к вырождению взаимокорреляционной функции.

В заключение авторы выражают благодарность Г. А. Ключко, Е. А. Никонову, А. Н. Соложенцеву и Е. А. Яценко за большую помощь в подготовке и проведении экспериментов.

Поступило в Редакцию 3/II 1976 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жильцов В. А. и др. «Атомная энергия», 1969, т. 26, вып. 5, с. 403.
2. Боланд Дж. Приборы контроля ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1973.
3. Mika C., Raes K., Stegemann D. In: IAEA Specialist Meeting on Analysis of Measurements to Diagnose Potential Failures. Rome, 10—12 Apr. 1972.
4. Termaat K. «J. Phys.», 1970, v. 3, N 43, p. 589.
5. Pallagi D., Horanyi S., Hargitai T. «Ann. Nucl. Energ.», 1975, v. 2, p. 333.
6. Сельванов В. М. и др. «Атомная энергия», 1969, т. 27, вып. 2, с. 101.
7. Ключко Г. А. и др. «Атомная энергия», 1973, т. 34, вып. 1, с. 40.
8. Морозов С. П., Наумов Е. Д. «Инж.-физ. журн.», 1968, т. XV, № 6, с. 1100.
9. Ибрагимов М. Х. и др. «Теплофизика высоких температур», 1974, т. 12, вып. 3, с. 542.

УДК 621. 039. 556

## Параметры нейтронных резонансов $^{245}\text{Сm}$ в области энергии нейтронов 1—30 эВ

БЕЛАНОВА Т. С., ЗАМЯТНИН Ю. С., КОЛЕСОВ А. Г., ЛЕБЕДЕВ В. М., ПОРУЧИКОВ В. А.

Полные нейтронные сечения и резонансные параметры  $^{245}\text{Сm}$  исследованы недостаточно. Кроме работы [1] до настоящего времени опубликованы еще две работы. В 1972 г. в результате измерений Берреса и др. на селекторе [2] были определены резонансные параметры уровней  $^{245}\text{Сm}$  в энергетическом интервале 1—30 эВ. На атомном взрыве [3] аналогичные данные были получены при измерении сечений деления в интервале энергии от 20 до 60 эВ. Общим недостатком измерений на селекторах [1, 2] является многоизотопность образцов кюрия и присутствие в них изотопов плутония и америция. Так, в работе [1] примеси  $^{240}\text{Pu}$  и  $^{243}\text{Am}$  составляли 1,6 и 2,2% соответственно, а в работе [2], кроме  $^{240}\text{Pu}$  (0,6—1,3%) и  $^{243}\text{Am}$  (0,2—0,3%), присутствовал  $^{243}\text{Сm}$  (1,5%).

В настоящей работе измерения резонансных параметров  $^{245}\text{Сm}$  выполнены для более чистого образца кюрия. Суммарное содержание примесей составляло 3,5, из них 2% платины; 0,23%  $^{240}\text{Pu}$  и <0,05%  $^{243}\text{Am}$ . Образец изготовлен из обезвоженного порошка устойчивой окиси кюрия с известным содержанием кислорода ( $\text{Сm}_2\text{O}_3$ ), который прошел специальную обработку [1]. В алюминиевую кассету с толщиной стенок 1 мм засыпано  $206,9 \pm 0,2$  мг порошка, занимающего объем  $0,8 \times 8,0 \times 9,0$  мм. Ниже приведены изотопный состав образца кюрия (%) и число ядер каждого изотопа для «толстого» варианта образца ( $10^{20}$  атом/см<sup>2</sup>):

$^{243}\text{Сm}$	< 0,09	—
$^{244}\text{Сm}$	86,68;	56,8
$^{245}\text{Сm}$	9,34;	6,1
$^{246}\text{Сm}$	3,79;	2,45
$^{247}\text{Сm}$	0,19;	0,12
$^{248}\text{Сm}$	< 0,09	—

На реакторе СМ-2 методом времени пролета было измерено пропускание для двух значений толщины образца ( $2,6 \cdot 10^{20}$  и  $6,4 \cdot 10^{20}$  атом/см<sup>2</sup>) в интервале энергии нейтронов 1—30 эВ. Нейтронная вспышка формировалась селектором с синхронно вращающимися роторами, подвешенными в магнитном поле [4]. Детектором нейтронов служила батарея гелиевых счетчиков. Лучшее энергетическое разрешение спектрометра составляло 70 нс/м. Статистическая погрешность измерений 1—2%, нейтронный фон менялся от 0,5 до 2,0%.

В данные по пропусканию вводилась поправка, учитывающая рассеяние нейтронов на кислороде.

Расчет резонансных параметров проводился методом площадей по одноуровневой формуле Брейта — Вигнера на БЭСМ-4М. В результате расчета определены положения уровней  $E_0$  и значение нейтронной ширины  $2g\Gamma_n$ , при этом величина радиационной ширины  $\Gamma_\gamma = 40$  мэВ (таблица). В таблицу также внесены значения резонансных параметров из работ [2, 3]. В результате сравнения были обнаружены расхождения между нашими данными и данными работы [2]. Для  $^{245}\text{Сm}$  впервые найдены резонансы с энергией 1,24; 2,45; 3,21; 9,40; 10,10; 13,60 и 18,60 эВ. Уровень 1,24 эВ идентифицирован неоднозначно, возможно, он принадлежит  $^{247}\text{Сm}$ .

Резонансные параметры  $^{245}\text{Сm}$

$E_0$ , эВ	$2g\Gamma_n$ , мэВ	$2g\Gamma_n$ , мэВ [2]	$2g\Gamma_n$ , мэВ [3]
$1,240 \pm 0,008^*$	—	—	—
$1,980 \pm 0,005$	$0,48 \pm 0,02$	$0,313 \pm 0,035$	—
$2,450 \pm 0,006$	$0,08 \pm 0,02$	—	—
$3,207 \pm 0,009$	$0,010 \pm 0,003$	—	—
$4,69 \pm 0,01$	$2,0 \pm 0,2$	$2,08 \pm 0,03$	—
$9,25 \pm 0,02$	$0,30 \pm 0,04$	$0,67 \pm 0,12$	—
$9,40 \pm 0,02^{**}$	$0,02 \pm 0,01$	—	—
$10,10 \pm 0,03$	$0,29 \pm 0,04$	—	—
$11,40 \pm 0,05$	$0,58 \pm 0,05$	$0,71 \pm 0,10$	—
$13,60 \pm 0,06$	$0,12 \pm 0,01$	—	—
$13,90 \pm 0,06$	$0,26 \pm 0,03$	$0,335 \pm 0,075$	—
$15,70 \pm 0,07$	$0,25 \pm 0,02$	$1,2 \pm 0,4$	—
$18,60 \pm 0,07^{**}$	$0,12 \pm 0,05$	—	—
$21,60 \pm 0,08$	$1,7 \pm 0,2$	$3,24 \pm 0,93$	2,11
$24,9 \pm 0,1$	$2,4 \pm 0,3$	$3,98 \pm 0,99$	2,6
$25,9 \pm 0,1$	0,05	—	0,036
$26,9 \pm 0,1$	$1,2 \pm 0,2$	—	0,76
$27,8 \pm 0,1$	$0,7 \pm 0,1$	$0,89 \pm 0,30$	0,6
$29,6 \pm 0,1$	$3,5 \pm 0,4$	$3,78 \pm 1,15$	3,46

\* Возможно уровень  $^{247}\text{Сm}$ .  
\*\* Сомнительные уровни.