

ВЫБОР ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА ТЕРМОКОРРЕЛЯЦИОННОГО РАСХОДОМЕРА

Б.В. Кебадзе, В.А. Шурупов

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



Термокорреляционный метод достаточно широко используется в стендовой и реакторной практике, в частности, для измерения расхода через тепловыделяющие сборки. Эксперименты на расходомерном стенде и реакторные петлевые испытания с использованием аппаратных и цифровых фильтров подтвердили сильную зависимость как систематической, так и случайной погрешности от выбора частотного диапазона. Даны некоторые практические рекомендации для различных условий по снижению суммарной погрешности.

Корреляционный метод с использованием температурных шумов достаточно широко используется в расходомерии как в стендовых, так и реакторных условиях [1, 2]. В частности, при реакторных испытаниях экспериментальных тепловыделяющих сборок необходимо обеспечить контроль теплогидравлических режимов, в том числе такого важного параметра, как расход теплоносителя через сборку. При этом к датчику расхода предъявляется ряд требований:

- компактность;
- надежность;
- длительный срок работы в радиационных полях;
- погрешность на уровне средства измерения (не более 2,5% от верхнего диапазона расхода).

Указанным требованиям удовлетворяют термокорреляционные датчики в силу следующих соображений:

- достаточно надежные и испытанные в реакторных условиях первичные преобразователи (микротермопары);
- малые габариты первичных преобразователей и измерительного участка в целом;
- отсутствие подвижных частей;
- выполнение контактирующих с теплоносителем (вода под давлением) поверхностей всех элементов измерительного участка исключительно из конструкционных материалов;
- отсутствие необходимости подвода питания к измерительному участку.

Другим важным фактором, обеспечивающим устойчивые и воспроизводимые показания, является определенность источника температурного шума. В предложенной и испытанной конструкции [3], схематически представленной на рис. 1, основная генерация шума происходит в области хвостовика ТВС, элементы кото-

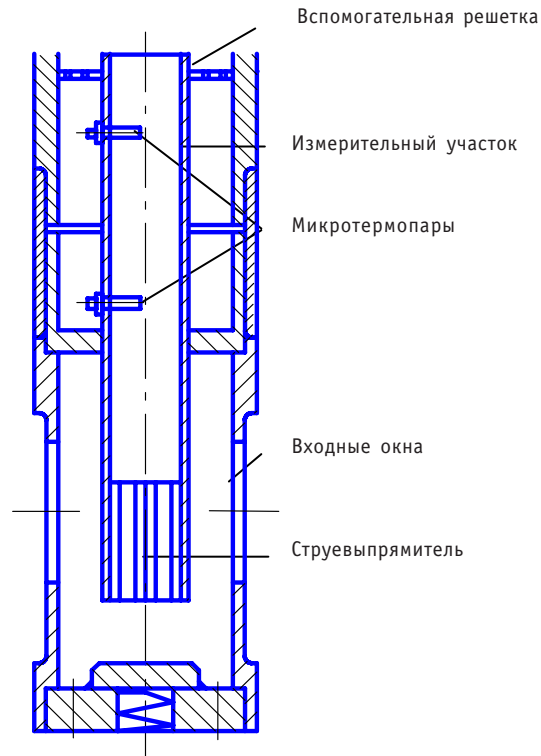


Рис. 1 Измерительный участок в хвостовике экспериментальной инструментальной кассеты (ЭИК)

рого нагреваются за счет радиационного энерговыделения и охлаждаются гидродинамически нестабилизированным потоком теплоносителя, поступающим через входные отверстия. Образующиеся при интенсивном смешении температурные неоднородности транспортируются через струевыпрямитель к первичным преобразователям измерительного участка, при выборе параметров которого (диаметр измерительных сечений и базовое расстояние L_B между ними) учитываются динамические характеристики микротермопар.

По положению максимума взаимнокорреляционной функции (ВКФ) на оси временного сдвига определяется среднестатистическое время переноса температурных неоднородностей между измерительными сечениями, τ_m . По известному базовому расстоянию L_B оценивается скорость переноса неоднородностей,

$$V_{\text{кор.}} = \frac{L_B}{\tau_m}.$$

При оценке расхода вводится поправочный множитель k , определяющий соответствие между среднестатистической скоростью переноса неоднородностей $V_{\text{кор.}}$ и средней скоростью потока:

$$G = k \cdot \frac{V}{\tau_m} = k \cdot G_{\text{ТКР}},$$

где V – объем между измерительными сечениями. Величина K_p , учитывающая специфику генерации и переноса неоднородностей в конкретной геометрии измерительного участка, устанавливается в ходе калибровочных экспериментов. При этом условия проведения последних должны быть максимально приближены к реальным по геометрии, гидравлике и теплообмену.

Введение такой коррекции означает существенное уменьшение систематической погрешности измерения расхода. В то же время уже на предварительном этапе целесообразно исключить очевидные источники погрешности в измерении истинного времени транспорта теплоносителя.

Существует несколько причин, по которым измеренное время запаздывания может отличаться от реального. Одна из них очевидна и заключается в различии постоянных времени датчиков температуры. Поэтому при оснащении измерительных участков необходимы предварительные оценки и отбор датчиков по их динамическим характеристикам.

Другая достаточно очевидная причина – тепловое взаимодействие потока со стенкой. Оно приводит к увеличению реального времени запаздывания по сравнению со временем транспорта теплоносителя между двумя измерительными сечениями. Оценку характерного времени такого взаимодействия можно найти в [4, 5]. Рассматривая отвод тепла от канала реактора в предположении, что теплопроводность твэла и коэффициент теплоотдачи от твэла к теплоносителю бесконечно велики, получают экспоненциальный закон охлаждения и среднее время отвода тепла – транспортное время теплового запаздывания

$$\tau_{\text{тр}} = \frac{L C_{\Sigma}}{v C},$$

где C – теплоемкость теплоносителя в канале длиной L , $C_{\Sigma} = C + C_{\text{ТВЭЛ}}$ – суммарная теплоемкость канала реактора.

Например, для измерительного участка с трубкой 26×1 (рис. 1) соотношение теплоемкостей стенки и теплоносителя при $H_{20} = 4200$ Дж/кг, $C_{\text{ст}} = 460$ Дж/(кг·град),

$\rho_{\text{Na}} = 1000$ кг/м³, $\rho_{\text{ст}} = 7800$ кг/м³ составляет $\frac{C_{\text{ст}}}{C_{\text{H}_2\text{O}}} \approx 0,12$, при этом $\tau_{\text{тр}} = 1,12 \frac{L}{v}$.

Другая составляющая тепловой инерции – конечное значение коэффициента теплоотдачи α . Для стенки с бесконечной теплопроводностью, омываемой потоком теплоносителя с температурой, которая полагается неизменной, соответствующая постоянная времени равна

$$\tau_{\alpha} = \frac{C}{\alpha F},$$

где C, F – теплоемкость и площадь на единицу длины соответственно. Для рассмотренного выше случая α определялось согласно [6] из соотношений:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha D}{\lambda} = 7,5 + 0,005 \text{Pe}; \quad \text{Pe} = \frac{vD}{a};$$

при $a = 1,5 \cdot 10^{-7}$, $\lambda = 0,6$ Вт/мК, номинальной скорости $v = 1$ м/с $\alpha \approx 1,2 \cdot 10^3$ Вт/м²К, $\tau_{\alpha} \approx 3$ с.

Указанные оценки дают представление о низкочастотных компонентах в динамике переноса температурных неоднородностей. В данном случае преобладает составляющая теплового запаздывания, связанная с коэффициентом теплоотдачи.

Более детальное описание нестационарного процесса может быть представлено на основе достаточно простой 2-зонной модели, где теплоноситель омывает плоскую стенку [4]. Предполагается, что температурные колебания охватывают полное сечение потока («снарядный» режим), теплопроводность жидкости идеальна, а диапазон рассматриваемых частот достаточно низок. В таких предположениях получается передаточная функция переноса неоднородности из некоторого начального нулевого сечения в точку z при скорости потока v

$$\Theta(z, \omega) = \Theta_0(\omega) \exp \left(- \left[1 + \frac{C_c / C_{ж}}{1 + j \omega \frac{C_{ж}}{\alpha} f \left(\sqrt{\frac{j \omega}{a} d} \right)} \right] j \omega \frac{z}{v} \right),$$

здесь $C_c, C_{ж}$ – теплоемкости стенки и жидкости на единицу длины соответственно, α – коэффициент теплоотдачи, a – температуропроводность стенки толщиной d , f – совокупность гиперболических функций.

Видно, что для очень низких частот ($\omega \rightarrow 0$) реальное время запаздывания превышало время транспорта потока в $(1 + C_c / C_{ж})$ раз. При росте частоты измеряемое время стремится ко времени транспорта z/v . При этом происходит затухание температурных пульсаций, пропорциональное времени транспорта.

Аналогичный по смыслу результат получается при рассмотрении измерительного участка в виде круглой трубы [7]; в качестве специальной функции фигурируют функции Бесселя.

Таким образом, при проведении корреляционных измерений целесообразно использовать верхний диапазон частот, где зависимость от частоты практически отсутствует. Нужно иметь в виду, однако, что приведенные выше оценки и расчетные соотношения могут рассматриваться лишь как предварительные рекомендации. Наличие аппаратного фильтра с постоянной времени $\tau_{\phi} \approx 0,8$ с (частота среза $f_n = 0,2$ Гц) позволяет существенно ослабить компоненты шума с постоянной времени $\tau_{\phi} = 3$ с при номинальном расходе теплоносителя. Окончательный выбор частотного диапазона производится экспериментально в ходе испытаний натурального либо модельного образца корреляционного расходомера. Широкие возможности при этом открывает цифровая фильтрация.

Методика стендовой градуировки предусматривает максимальное приближение к реальным условиям. Радиационный нагрев хвостовика экспериментальной кассеты моделировался с помощью кольцевого нагревателя, охватывающего область входных окон (рис. 1). Регулируемая мощность нагревателя (300–1500 Вт) соответствовала радиационному энерговыделению при петлевых испытаниях.

При проведении стендовой градуировки использовался набор фильтров высокой частоты типа Кайзера–Бесселя с крутизной не менее 40 дБ/октаву и частотами среза f_n , приведенными в табл. 1. По мере более жесткого подавления низких частот с ростом f_n наблюдается слабая тенденция к уменьшению измеряемого времени запаздывания. Можно отметить, что при вдвое меньшем расходе, где постоянная времени τ_{α} примерно в два раза больше и тепловое воздействие более инерционно, подобной тенденции не наблюдается, т.е. аппаратного фильтра достаточно для подавления низкочастотной составляющей (табл. 1б). Отклонения измеренного времени запаздывания (табл. 1а) во всем частотном диапазоне находится в пределах 1%. Дальнейшие исследования показали, что в низкочастотной части диапазона могут действовать и другие механизмы.

При градуировке использовалось среднее значение транспортного запаздывания τ для параметра $f_n = 1,8 \div 2,8$ (табл. 1), где при номинальном расходе $G \approx 4 \cdot 10^{-4}$ м³/ч после слабого монотонного спада τ от начала частотного диапазона наблюдается явно выраженное плато. Результаты градуировки корреляционного расходомера на «горячем» ($P = 16 \pm 0,1$ МПа, $T = 140 \pm 5$ К) и «холодном» ($P = 16 \pm 0,1$ МПа, $T = 30 \pm 2$ К) стендах достаточно близки и описываются соотношениями

$$G = 1,0092 G_{\text{ТКР}} + 0,0096$$

Таблица 1

**Параметры сигналов и результаты измерений
(длительность реализации $T = 20$ с)**

f_n , Гц	0	1,0	1,3	1,5	1,8	2,0	2,3	2,5	2,8	3,0
а) Стендовые измерения, $G = 3,97 \cdot 10^{-4}$ м³/с										
τ , мс	56,68	56,30	56,22	56,17	56,12	56,10	56,11	56,15	56,25	56,36
ρ	0,901	0,842	0,823	0,811	0,793	0,782	0,766	0,755	0,739	0,728
A_m , мкВ	0,308	0,241	0,224	0,214	0,199	0,189	0,175	0,166	0,152	0,143
G , м³/с, 10^{-4}	3,897	3,922	3,928	3,933	3,936	3,936	3,936	3,933	3,928	3,919
$\sigma_{отн.}$	2,33	2,40	2,52	2,62	2,78	2,88	3,02	3,09	3,16	3,19
б) Стендовые измерения, $G = 2,00 \cdot 10^{-4}$ м³/с										
τ , мс	110,5	110,8	110,9	110,9	111,1	111,2	111,6	111,7	111,9	112,0
ρ	0,857	0,718	0,673	0,646	0,613	0,594	0,568	0,553	0,533	0,520
A_m , мкВ	2,213	1,279	1,125	1,048	0,959	0,911	0,849	0,811	0,758	0,724
G , м³/с, 10^{-4}	2,00	1,994	1,992	1,992	1,989	1,986	1,981	1,978	1,975	1,972
$\sigma_{отн.}$	3,45	3,48	3,63	3,83	4,14	4,31	4,52	4,63	4,74	4,79
в) Реакторные испытания, $G = 3,99 \cdot 10^{-4}$ м³/с										
τ , мс	47,54	53,07	53,78	54,09	54,57	54,91	55,33	55,59	55,91	56,05
ρ	0,463	0,487	0,504	0,517	0,534	0,542	0,550	0,552	0,553	0,554
A_m , мкВ	1,129	0,632	0,529	0,472	0,402	0,364	0,319	0,294	0,264	0,247
G , м³/с, 10^{-4}	4,508	4,161	4,108	4,083	4,047	4,022	3,992	3,975	3,950	3,942
$\sigma_{отн.}$	12,69	7,36	6,39	5,95	5,41	5,09	4,70	4,52	4,40	4,40

$$G = 0,9915 G_{ТКР} - 0,0041$$

соответственно. В стендовых условиях статистическая погрешность в указанном частотном диапазоне не является минимальной, однако его выбор оказался правильным с точки зрения применения в реакторных условиях, для которых характерны заметные низкочастотные возмущения.

Параметры сигналов (уровень корреляции ρ , частотный состав) сильно влияют и на величину случайной погрешности, что видно из соотношения [8]:

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{\mu_{1/2}}{2\tau_m} \cdot \frac{\left[\frac{\Phi}{T} (1 - \rho^2) \right]^{1/2}}{\rho}$$

для среднеквадратического отклонения времени транспорта. Приведенные здесь параметры (ρ , Φ , $\mu_{1/2}$) взаимосвязаны. Области частот, где обеспечивается практическое отсутствие влияния теплового запаздывания и минимум случайной погрешности, могут не совпадать. Так, из-за сильной зависимости $\sigma = \sigma(\rho)$ в условиях стендовой градуировки минимум статистической погрешности сдвинут в сторону низких частот. Но в условиях реального объекта ситуация может быть иной.

При реакторных испытаниях экспериментальной кассеты с предварительно проградуированным термокорреляционным расходомером использовалась та же самая аппаратура и программное обеспечение, что и при стендовой градуировке. Существенное различие состоит лишь в том, что в условиях стенда стабильность теплогидравлических параметров (мощность нагревателя и других) почти идеальная, тогда как при петлевых испытаниях на реакторе наблюдались отклонения энерговыделения в пределах нескольких процентов от номинального значения

вследствие срабатываний регулятора нейтронной мощности. Они происходят несколько раз в течение цикла измерений и служат источником низкочастотных возмущений. В частности, появляются низкочастотные составляющие в сигналах термопар, обусловленные прямым радиационным нагревом их спаев. По соотношению амплитуд в различных частях диапазона видна большая доля низкочастотных шумов при реакторных испытаниях (табл. 1а, в). Их некоррелированность с пролетной составляющей отражается в резком падении уровня корреляции в области контролируемого временного запаздывания по сравнению со стендовыми условиями (табл. 1а, в). Низкочастотные синхронные колебания при корреляционной обработке приводят к наличию симметричной относительно начала координат составляющей ВКФ, которая дает смещение максимума пролетной составляющей ВКФ в сторону меньших времен. Этот эффект практически устраняется за счет подавления низких частот с помощью фильтров.

Необходимо отметить также, что специфика реакторных условий сказалась на оптимальной с точки зрения минимума статистической погрешности области частот: если в стендовых условиях за счет высокого уровня корреляции пролетной составляющей она соответствует полному диапазону, захватывающему и область низких частот, то в реакторных условиях она сдвинута в сторону высоких частот ($f \geq 3$ Гц), и абсолютная величина погрешности существенно выше. Для достижения заданной статистической погрешности в данном случае необходимо более длительное время измерения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение аппаратных и цифровых фильтров высокой частоты позволяет практически устранить систематическую погрешность термокорреляционных измерений, обусловленную тепловым взаимодействием потока со стенкой. Эта же фильтрация оказывается полезной в реальных условиях петлевых испытаний для подавления синхронной низкочастотной помехи, некоррелированной с пролетной составляющей и приводящей к систематической погрешности измеряемого времени транспорта запаздывания.

Полученные на стенде градуировочные характеристики соответствуют диапазону $f_n = 1,8 \div 2,8$ Гц. В этой области статистическая погрешность измерений в реакторных условиях была минимальна, тогда как при стендовых измерениях минимум находился в области низких частот. Систематическая погрешность (1,5% от верхнего предела) определяется в основном параметрами градуировочного стенда. В реакторных условиях суммарная погрешность составила $\pm 2,5\%$ при времени измерения $T = 3$ мин.

При обработке сигналов в ходе метрологических испытаний целесообразно использовать набор фильтров с тем, чтобы выбрать в дальнейшем оптимальный частотный диапазон с точки зрения минимизации погрешности.

Литература

1. Селиванов В.М. и др. Использование температурного шума теплоносителя для измерения расхода в технологических каналах РБМК//Атомная энергия. – 1983. – Т. 54. – Вып. 3. – С.166-169.
2. Por G., Berta M., Csuvár M. Measurement of the Coolant Flow Rate using Correlation of Temperature Fluctuations//Progress in Nuclear Energy. – 2003. – Т. 43. – № 1-4. – P. 281-288.
3. Кебадзе Б.В., Лагутин А.А., Ланских В.С., Шурупов В.А. Многоканальная термокорреляционная система измерения расхода через тепловыделяющие сборки/Сб. докладов 2-й Всероссийской научно-технической конф. «Датчики и детекторы для АЭС». – Пенза: НИИ физических измерений, 2004. – С. 215-224.
4. Raes K.-H. Systembedingte Fehler bei der Geschwindigkeitmessung aus der Korrelation von

Temperatursignalen/Proc. der Fachtagung der Kerntechnischen Gesellschaft (Berlin, 10-12 März). – Paper FV 2.9.

5. Крамеров А.Я., Шевелев Я.В. Инженерные расчеты ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1965.

6. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – С. 253, 122.

7. Benkert J. et al. Determination of thermocouples transfer functions and fluid flow velocities by temperature noise measurements in liquid sodium//Progress in Nucl. Energy. – 1977. – V. 1. – № 2 - 4. – P. 55.

8. Кебадзе Б.В. Анализ статистической погрешности и оптимизация корреляционных расходомеров//Атомная энергия. – 1984. – Т. 56. – Вып. 1. – С. 15-20.

Поступила в редакцию 8.10.2007

Contribution of (γ , n) reactions to entire neutron intensity of WWER-1000 spent fuel was estimated according with his burn-up degree.

УДК 621.039.542:536.24

Experimental Researches of Direct Contact Steam Generators Characteristics with Heavy Liquid Metal Heat-Carriers \A.V. Beznosov, T.A. Bokova, S.U. Savinov, P.A. Bokov, M.D. Zefirov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 10 pages, 8 illustrations. – References – 4 titles.

Experimental researches of direct contact lead and lead-bismuth heat-carriers steam generators elements characteristics are resulted.

The water-steam phase input and dispergation devices entered into liquid metal, formed bubbles sizes, the bubbles emersion speed, characteristics of heat exchange between liquid metal and bubbles were researched. Experiments were conducted under a range of lead and lead-bismuth eutectic temperatures 350-550°C; pressure of submitted water 0,2-8,0 MPa; forming bubble and the jet (torch) outflow charges of water up to 200 kg/h; durable liquid metal free surface steam loading up to 10,0 m³/m²h.

УДК 621.039.534

Numerical Modeling of Fragmentation in Liquid Media with Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) Method \A.P. Vorobev, V.I. Kriventsev, Qian Lin, Xuewu Cao; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 10 pages, 3 illustrations. – References – 10 titles.

An application of the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method to liquid media fragmentation is demonstrated. Sample hydrodynamics problems are solved numerically. The detailed mathematical explanation of the method is given for non-viscous fluid approach while using artificial dissipative term applied in the Euler equation.

УДК 536.24.621.039.526

Natural Convection Specificity in Complex Loops \S.G. Kalyakin, Yu.P. Djusov, Yu.Yu. Shteyn, Yu.V. Klimanov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 10 pages, 1 table, 5 illustrations. – References – 10 titles.

Now the natural convection is of great interest for many researchers from the point of view its use in the systems of passive cooling and removal of residual heat from nuclear reactor core at accident situations. Due to it investigation of the natural convection specificity is rather actual and useful for the NPP safety validation.

In this paper the investigation of natural convection evolution dynamics in closed loop is presented and the character of flow parameters changing in dependence of different factors (heat generation intensity, loop geometry) is shown.

УДК 621.039.564

Choosing of Frequency Range for Thermocorrelation Flowmeter \B.V. Keadze, V.A. Shurupov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 7 pages, 1 table, 1 illustration. – References – 8 titles.

Thermocorrelation method is widely used at test facilities and reactors in particular for flow measurement in fuel subassemblies. The experiments at flow calibration rig and reactor loop using hardware and digital filters suggested strong dependence of booth systematic and statistical error from frequency range chosen. Some practical recommendations are given for different conditions with the aim to minimize total error.

УДК 532.542:621.181.6

The Reduce of VVERs Steam Generator Power Output due to Deposits on the Tubes \A.A. Lukyanov, V.B. Smykov, Yu.S. Yuriev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya