

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ МАЛЫХ СКОРОСТЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Б.В. Кебадзе, А.Н. Опанасенко, В.А. Шурупов, М.С. Тимченко

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



При моделировании системы аварийного расхолаживания быстрого реактора на водяном стенде с помощью термокорреляционного метода оценивались скорости естественной циркуляции. На проливочной установке с принудительной циркуляцией проведена градуировка термокорреляционного измерительного канала для внутренней и наружной полостей имитатора тепловыделяющей сборки (ИТВС). Определен частотный диапазон измерений, получены поправочные коэффициенты для расчета истинного расхода. Предложены конструктивные усовершенствования измерительного участка с целью устранения влияния закрутки потока.

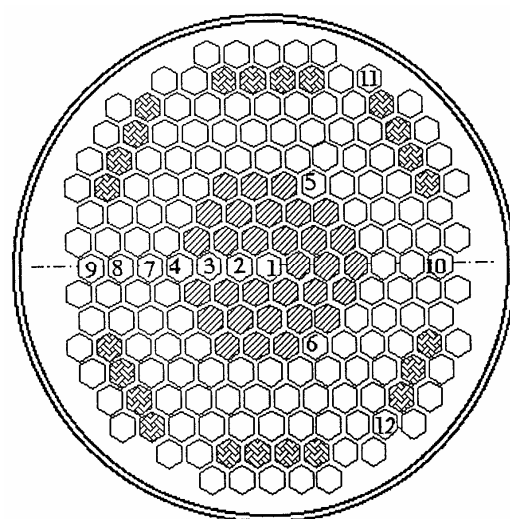
При моделировании системы аварийного расхолаживания (САРХ) быстрого реактора на водяном стенде с помощью корреляционного метода оценивались скорости естественной циркуляции в различных режимах [1]. В настоящей работе более подробно рассматриваются характеристики измерительного канала.

В состав модельного стенда САРХ входит более сорока имитаторов тепловыделяющих сборок (ИТВС) с электронагревателями (рис. 1). Из условий моделирования энерговыделения используют внутренний (НГ_в) и наружный (НГ_н) нагреватели; подводимая к ним мощность обозначается как N_v и N_n соответственно. При развитии естественной циркуляции теплоноситель движется снизу вверх как по внутреннему кольцевому зазору, так и в зазоре между стенками ИТВС в межпакетном пространстве (МПП). В качестве первичных преобразователей при корреляционных измерениях использовались расположенные вдоль по потоку термодпары: T_1, T_2 – во внутреннем канале, T_3, T_4 – на наружной поверхности имитатора для контроля потока в МПП (рис. 2). Измерительный участок с термодпарами для корреляционных измерений располагался непосредственно за внутренним и наружным нагревателями, которые служили источниками температурных шумов.

Для повышения быстродействия использовались утоненные до $\varnothing 0,5$ кабельные термодпары градуировки ХК; по ходу трассировки их внешняя оболочка приваривалась лазерной сваркой к элементам конструкции. Чувствительные окончания термодпар отгибались от поверхности стенки в потоке на $\sim 0,5$ мм и располагались на базовом расстоянии $L_b = 10 \pm 0,2$ мм друг от друга.

Для преобразования малых шумов сигналов ТЭП в сигналы стандартного для работы быстродействующих АЦП уровня были разработаны и изготовлены малошумящие помехозащищенные усилители с гальванической развязкой входа-выхода, уровнем собственных шумов в полосе 0,2–20 Гц $< 0,1$ мкВ и подавлением наводки промышленной частоты на уровне 100 дБ.

© Б.В. Кебадзе, А.Н. Опанасенко, В.А. Шурупов, М.С. Тимченко, 2009



- ▨ – обогреваемые сборки АЗ
- ▤ – обогреваемые сборки хранилища
- – необогреваемые сборки стальной и борной защиты

Цифрами обозначены инструментированные сборки с термодатчиками

Рис. 1. Модель активной зоны

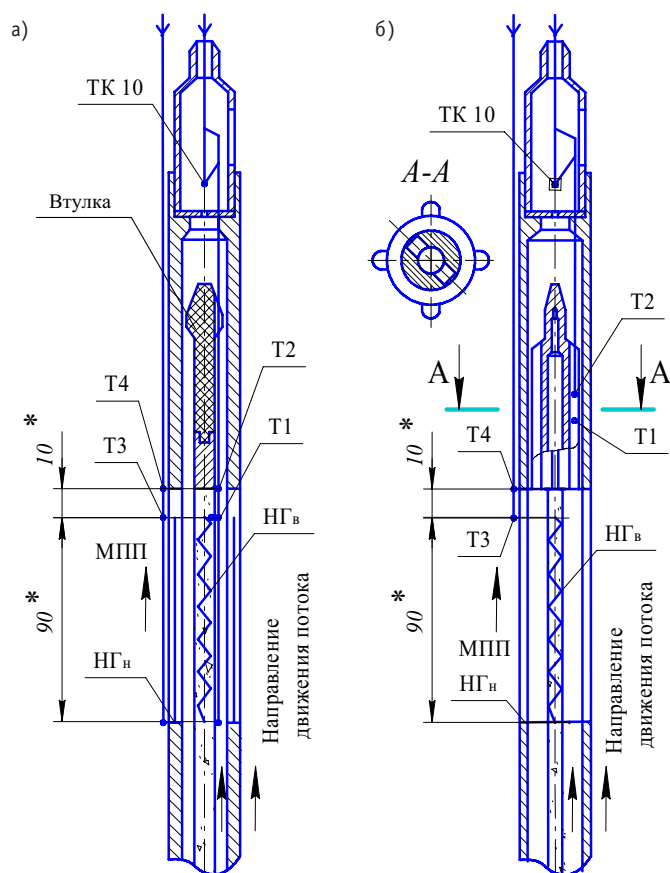


Рис. 2. Размещение термопреобразователей и нагревателей на имитаторах: а) – первоначальный вариант, б) – модернизированный вариант

При разработке измерительного канала принимались меры по минимизации погрешности. Одним из возможных источников таковой при корреляционных измерениях является различие динамических характеристик первичных преобразователей. Проводилась оценка их инерционности по стандартной методике и последующий отбор.

Термопреобразователь подключают к ЭВМ через усилитель с гальванически развязанным входом и помещают в сосуд с кипящей водой, затем быстро переносят в жидкостной термостат с температурой $25 \pm 10^\circ\text{C}$, и спектроанализатор – регистратор «L-Graph» производит запись переходного процесса на ПК. Обработку экспериментальных результатов с целью определения показателя тепловой инерции производят по ГОСТ 6616-94 п. 5.3. Пример переходного процесса для термопреобразователя диаметром 0,5 мм с совместным спаем показан на рис. 3. Показатель тепловой инерции определяется по графику, построенному в полулוגарифмическом масштабе. На нем выделяют прямолинейный участок между T_1 и T_2 , соответствующий регулярному режиму охлаждения. По координатам этого

участка находится показатель тепловой инерции $\varepsilon = \frac{T_2 - T_1}{\ln N_1 - \ln N_2}$, соответствующий времени, за которое температура изменится на 63% от задаваемого при поверке перепада температуры. Отбирались первичные преобразователи с постоянной времени $25 \pm 2,5$ мс.

Измеренные на модельном стенде скорости естественной циркуляции лежат в диапазоне 0,01–0,06 м/с [1], что при заданной базе L_B соответствует временам запаздывания $\tau = 160$ –1000 мс. При наименьших значениях τ погрешность из-за различия постоянных времени первичных преобразователей не выходит за пределы $\pm 2,0$ % от измеряемого значения.

Другая причина систематической погрешности определяется тепловым взаимодействием потока со стенкой, которое приводит к увеличению измеряемого времени запаздывания температурного сигнала по сравнению со временем транспорта теплоносителя между измерительными сечениями. Выбором частотного диапазона эта погрешность может быть практически исключена [2]. Постоянная

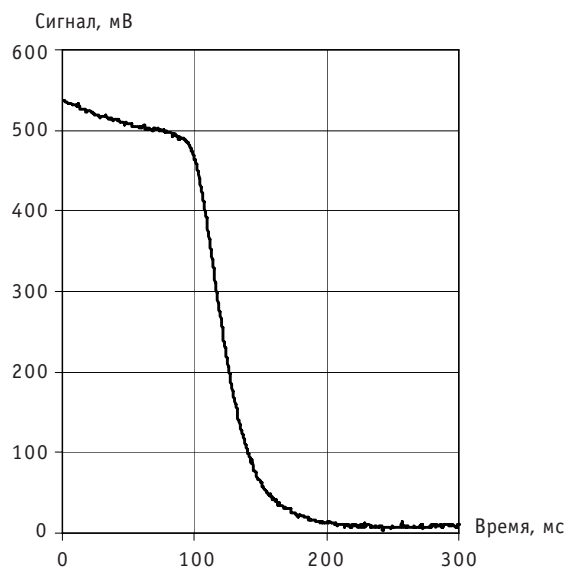


Рис. 3. Переходный процесс при определении инерционности ($\varepsilon = 0,027\text{с}$)

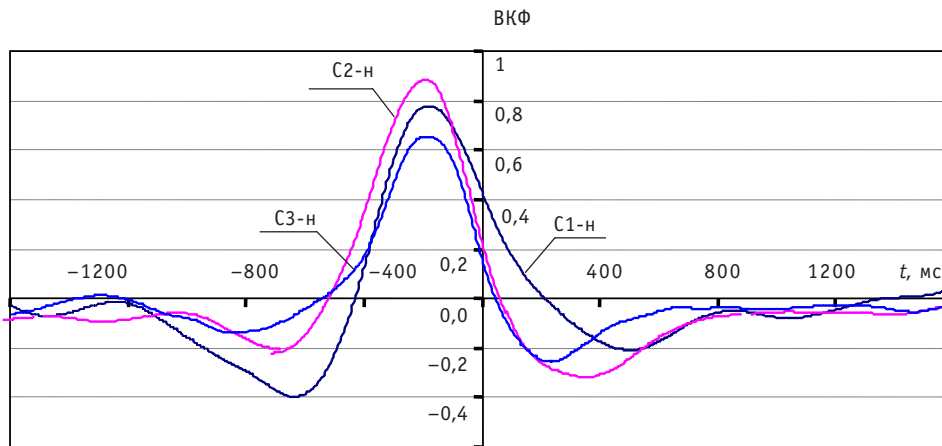


Рис. 4. Пример взаимно корреляционных функций для потока в наружной полости ($N_B = 6$ кВт, $N_H = 12$ кВт)

времени теплового запаздывания оценивается как $\tau_m = \frac{L_B \cdot C_\Sigma}{V \cdot C}$, где $C_\Sigma = C + C_{\text{ст}}$ – суммарная теплоемкость канала длиной L_B , C – теплоемкость теплоносителя, $C_{\text{ст}}$ – теплоемкость стенки. Параметры имитатора ТВС таковы, что величина τ_T в несколько раз превышает время транспорта теплоносителя $\frac{L_B}{V}$ и составляет в исследуемом диапазоне скоростей единицы секунд. Используемые в экспериментах полосовые фильтры практически полностью исключают низкочастотную составляющую. Например, нижней границе фильтра $f = 0,6$ Гц соответствует характерное время $t \approx 0,3$ с.

Пример полученных в экспериментах на модельном стенде функций взаимной корреляции для термпар в наружной полости приведен на рис. 4.

Для оценки соответствия скоростей, измеряемых корреляционным методом, средней скорости потока были проведены специальные эксперименты на малом стенде, схема которого показана на рис. 5. На испытательном участке стенда устанавливался имитатор тепловыделяющей сборки, в точности соответствующий по конструкции и параметрам имитаторам, которые использовались на стенде САРХ. Внутренняя и наружная полости имитатора являются составными частями самостоятельных контуров со своими теплообменниками ($T1, T2$) и независимыми средствами контроля расхода (ротаметры $P1, P2$). Подводимая к внутреннему и наружному нагревателям мощность измерялась с помощью ваттметров $W1, W2$. В экспериментах использовалась та же самая измерительная аппаратура и то же программное обеспечение, что и на основном стенде.

В эксперименте широко использовались возможности цифровой фильтрации, в частности для подавления высокочастотных составляющих, включая наводку промышленной частоты. Пример зарегистрированных температурных флуктуаций приведен на рис. 6. Уровень температурного шума сильно зависит от скорости потока и подводимой мощности. Некоторые данные для трех вариантов фильтрации (фильтр низкой частоты с полосой до 2 Гц, полосовые фильтры в диапазонах 0,6–3 Гц и 2–6 Гц) приведены в табл. 1.

В ходе градуировки расход изменялся ступенями от нижней части диапазона к верхней и в обратном направлении. Его величина определялась по показаниям ротаметра. При обработке шумовых сигналов использовалась система параллельных фильтров с различными параметрами. Такой подход позволял проводить предварительный анализ непосредственно в процессе эксперимента. Так при резком

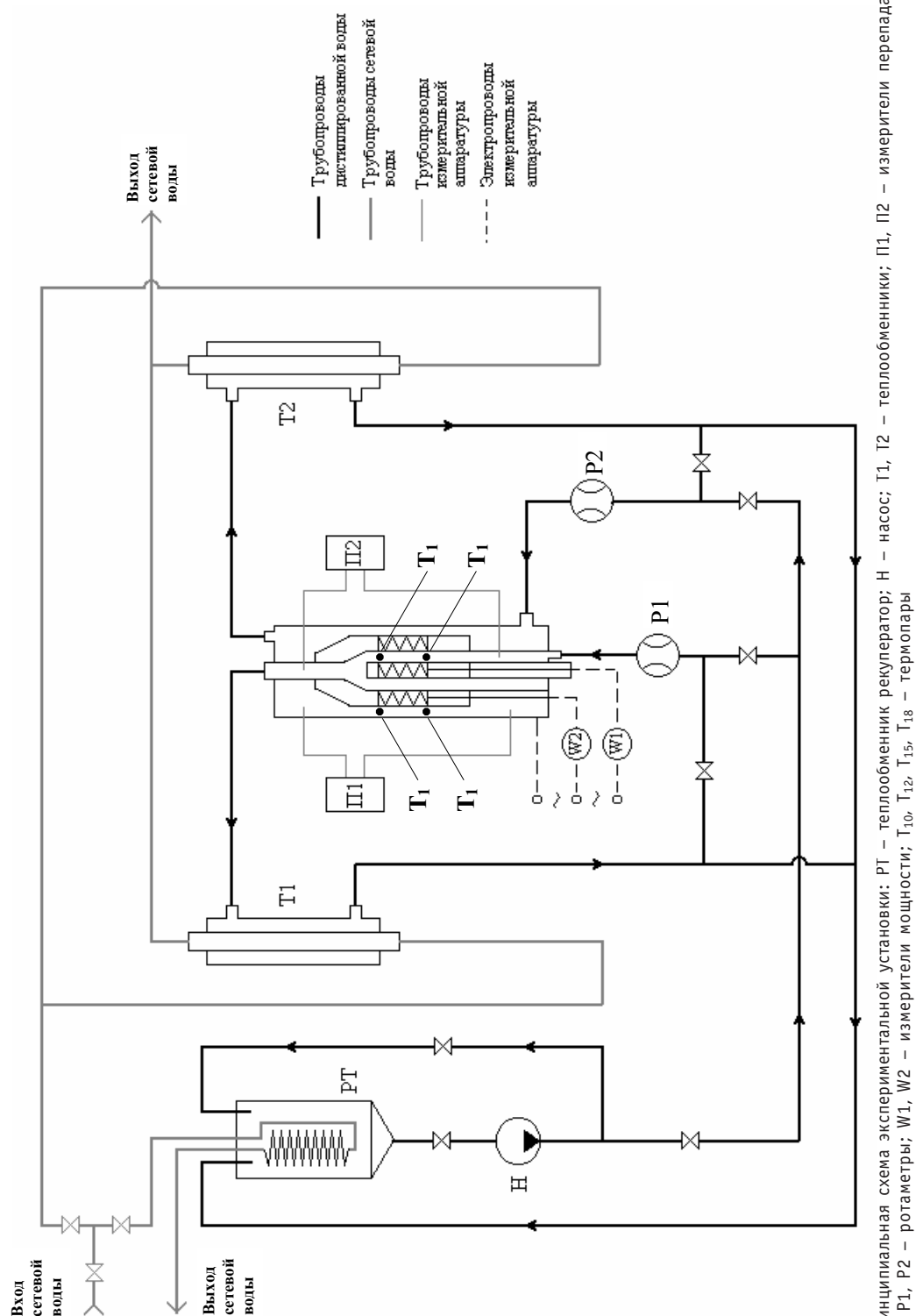


Рис. 5. Принципиальная схема экспериментальной установки: РТ – теплообменник рекуператор; Н – насос; Т₁, Т₂ – теплообменники; П1, П2 – измерители перепада давления; Р1, Р2 – ротаметры; W1, W2 – измерители мощности; Т₁₀, Т₁₂, Т₁₅, Т₁₈ – термометры

Таблица 1

Уровни шума сигналов ТЭП

$\begin{matrix} P \\ \text{ТКР} \end{matrix}$	$V_{\text{рот.}}$	см/с	9	8,25	7,5	6,75
1 ИК* (LP_2)	σ_1	мкВ	5,3	5,3	3	1,8
	σ_2	мкВ	2,907	3,12	1,701	1,056
2 ИК (BP_0,6_3)	σ_1	мкВ	5,42	5,09	3,03	1,62
	σ_2	мкВ	3,006	2,964	1,703	0,931
3 ИК (BP_2_6)	σ_1	мкВ	3,811	3,721	1,593	0,762
	σ_2	мкВ	2,105	2,121	0,854	0,418

*ИК – измерительные каналы с разными частотными диапазонами

переходе на более низкую ступень по расходу в некоторых режимах обнаружена сильная зависимость временного сдвига ВКФ от частотного диапазона (рис. 7). Отметим, что в условиях естественной циркуляции изменение ее скорости происходит достаточно медленно (характерные времена – десятки секунд). Видно (рис.7а), что при значении скорости по ротаметру $V_{\text{рот}} = 9$ см/с временное запаздывание для различных фильтров отличается незначительно. При быстром пере-

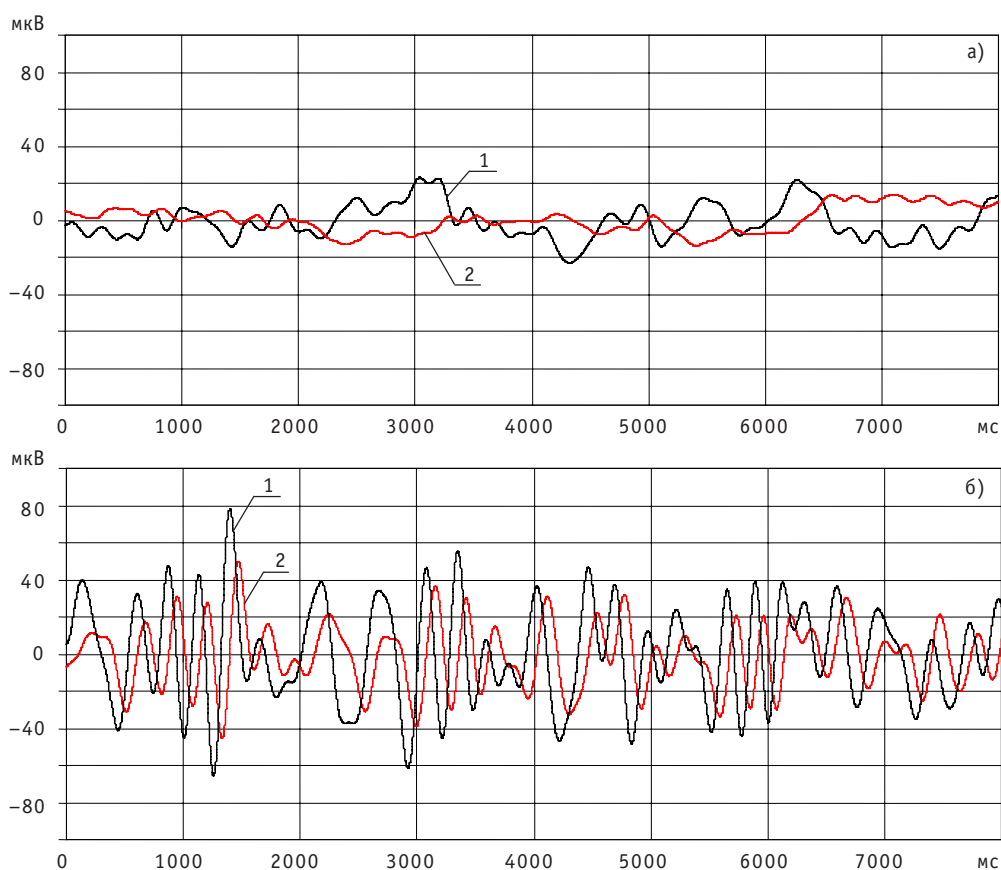
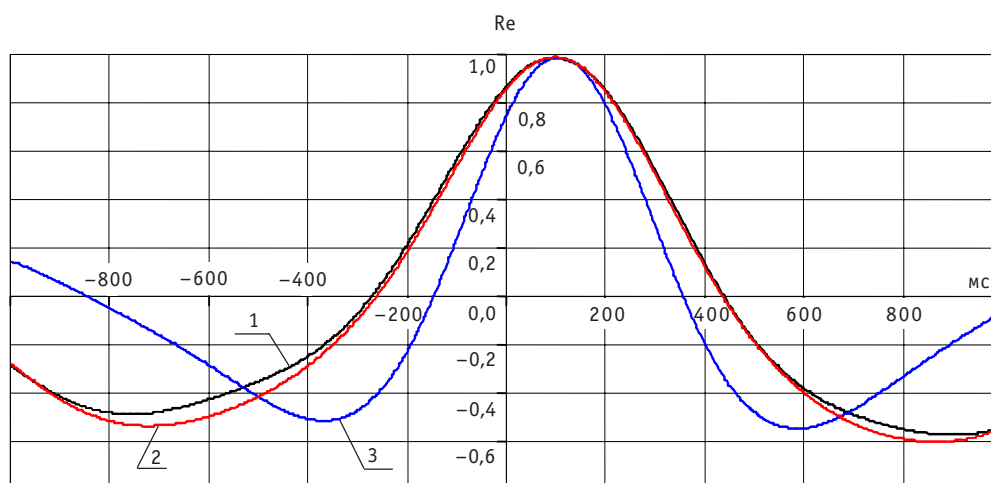
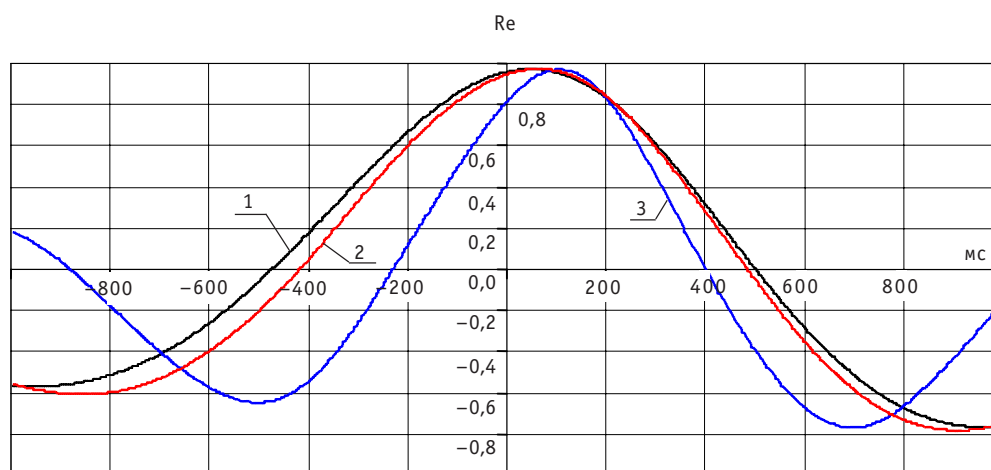


Рис. 6. Примеры флуктуаций сигналов после фильтрации с помощью фильтра НЧ $f_{\text{ср}} = 5$ Гц: 1 – сигнал первого по потоку ТЭП; 2 – сигнал второго по потоку ТЭП; а) режим $n_{\text{рот}} = 10$ дел. ($V = 3$ см/с); б) режим $n_{\text{рот}} = 40$ дел. ($V = 12$ см/с)

а). Режим $n_{\text{рот}} = 30$ дел. ($V_{\text{рот}} = 9$ см/с)б). Режим $n_{\text{рот}} = 22,5$ дел. ($V_{\text{рот}} = 6,75$ см/с)Рис. 7. Вид ВКФ для различных режимов измерения во внутренней полости имитатора ТВС;
 $N_{\text{внутр. нагр}} = 30$ Вт; 1 – фильтр 0,3–2 Гц; 2 – фильтр 0,6–3 Гц; 3 – фильтр 2–6 Гц

ходе на режим с меньшей скоростью ($V_{\text{рот}} = 6,75$ см/с) это различие существенно, причем более низкочастотному диапазону соответствует меньшее время сдвига (рис. 7б).

Наиболее вероятная причина наблюдаемого явления – возникновение нерегулярной медленной тангенциальной закрутки потока. В условиях радиального температурного градиента она может создавать практически синхронные низкочастотные колебания температуры в разнесенных по высоте точках регистрации и вносить искажения в истинное время транспортировки теплоносителя вдоль канала в сторону меньших значений. Данные таких режимов для калибровки не использовались. Для дальнейших экспериментов предложено конструктивное решение, практически исключающее влияние закрутки (рис. 2б). Оно будет рассмотрено далее.

Градуировочная характеристика для внутренней полости имитатора при мощности внутреннего нагревателя $N = 30$ Вт, полученная с помощью цифрового фильтра 0,6–3 Гц, представлена на рис. 8, данные – в табл. 2.

Таблица 2

Данные градуировочных испытаний для внутренней полости имитатора

V_p , м/с	$V_{ткр}$, м/с
0,015	0,017
0,023	0,021
0,030	0,030
0,038	0,036
0,045	0,041
0,053	0,056
0,062	0,061
0,068	0,071
0,075	0,078
0,083	0,085
0,090	0,096

Таблица 3

Данные градуировочных испытаний для наружной полости имитатора

V_p , м/с	$V_{ткр}$, м/с
0,0152	0,0153
0,0303	0,0312
0,0455	0,0411
0,0512	0,0510
0,0606	0,0644
0,0682	0,0661
0,0758	0,0825
0,0909	0,0955
0,1061	0,1083
0,1170	0,1150
0,1212	0,1271

При измерениях в наружной полости также использовался набор фильтров в параллельном режиме работы. Для построения градуировочной характеристики датчика в наружной полости использовался сигнал в диапазоне 0,4–3 Гц (рис. 9, табл. 3).

Погрешность определения поправочного множителя (коэффициента линейной регрессии, рис. 8, 9) определяется, в основном, погрешностью ротаметра $\Theta_{рот}$, погрешностью определения расстояния L_B между термопарами Θ_{L_B} и ошибкой в регрессионной зависимости $\Theta_{рег}$. Величина доверительного интервала Δ для доверительной вероятности $P = 0,95$ определяется соотношением

$\Delta = 1,1\sqrt{\Theta_{рот}^2 + \Theta_{L_B}^2 + \Theta_{рег}^2}$. Величина $\Theta_{рот} = 2,5\%$, а $\Theta_{L_B} = 2\%$. Величина $\Theta_{рег}$ для внутренней полости (рис. 8) составляет 3%, для наружной полости (рис. 9) – 3,06%.

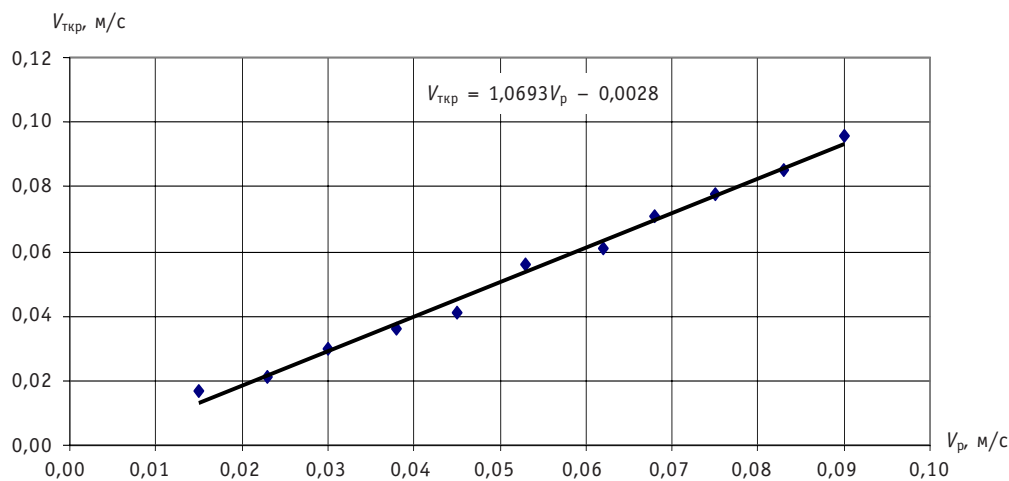


Рис. 8. Градуировочная характеристика для внутренней полости имитатора ТВС ($N_{внутр. нагр} = 30$ Вт)

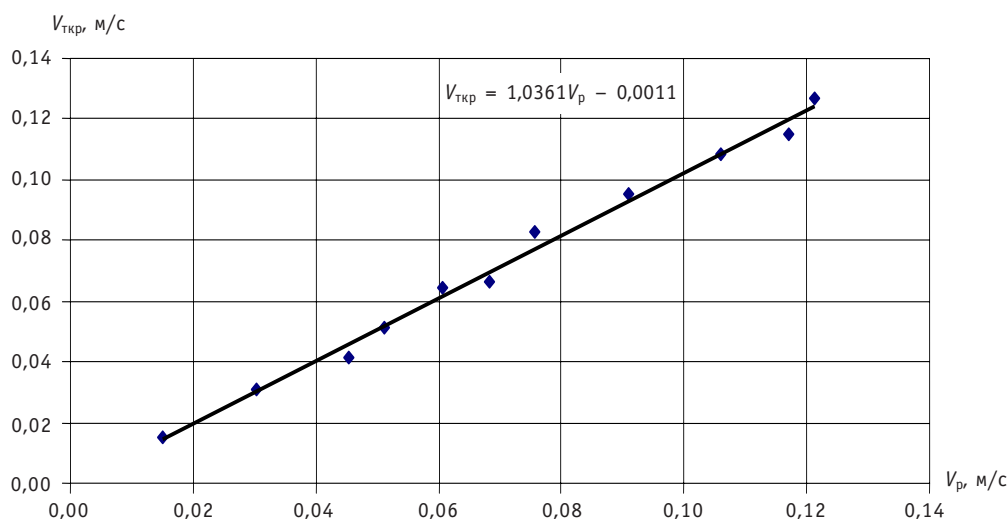


Рис. 9. Градуировочная характеристика для наружной полости имитатора ТВС ($N_{\text{внутр. нагр}} = 100$ Вт)

Суммарная погрешность Δ составляет 4,82 и 4,87 % соответственно. Столь заметная погрешность связана, в основном, с невысокими метрологическими параметрами опорного расходомера, а также с ограниченным объемом экспериментальных данных. Полученные результаты можно рассматривать как предварительные. По ним видно, что отклонения поправочного множителя от единицы находятся в пределах 10%; они значимы и их следует учитывать при измерении расхода корреляционным методом. Для достижения большей точности при определении расхода следует использовать при градуировке термокорреляционного расходомера опорный метод более высокого метрологического уровня (например, объемно-временной).

Для исключения влияния закрутки предложено усовершенствование измерительного участка. В исходном варианте втулка во внутренней полости выполнена из тефлона. В новом варианте в качестве конструкционного материала, как и в других элементах имитатора, используется нержавеющая сталь (рис. 26). Протяженность дистанционирующих ребер существенно увеличена. Термодары T_1 , T_2 для корреляционных измерений установлены на участке между ребрами. Внутреннее отверстие во втулке предназначено для снижения ее теплоемкости и соблюдения условий моделирования. На дистанционирующие ребра наносится тефлоновое покрытие.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На проливочном стенде проведены градуировки термокорреляционного расходомера во внутреннем и наружном каналах имитатора ТВС, идентичного по конструкции и параметрам имитаторам стенда по изучению системы аварийного расхолаживания. Полосовые цифровые фильтры использовались как для оперативного контроля данных, получаемых в ходе предварительных экспериментов, так и при проведении градуировки.

В диапазоне средних скоростей 1,5–10 см/с определены поправочные коэффициенты, позволяющие перейти от скорости, измеренной корреляционным способом, к ее истинному среднему значению. Отклонения этих коэффициентов от единицы сравнительно невелики (в пределах 10%). При подготовке эксперимента по изучению аварийного расхолаживания целесообразно проводить градуиров-

ку инструментованных имитаторов ТВС перед установкой их в модель активной зоны и пользоваться ее результатами при расчете расходов через сборки.

Для устранения эффекта тангенциальной закрутки во внутренней полости модели ТВС предложены конструктивные решения в виде направляющих, задающих продольное направление потока.

Литература

1. Кебадзе Б.В., Лагутин А.А., Опанасенко А.Н. и др. Корреляционные измерения скорости теплоносителя при моделировании системы аварийного расхолаживания // Датчики и системы. – 2007. – № 1. – С. 22-25.
2. Кебадзе Б.В., Шурупов В.А. Выбор частотного диапазона термокорреляционного расходомера // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – № 1. – С. 3-9.

Поступила в редакцию 1.10.2008

measurement data accordance was less than 10% under the short cooling times (< 100 days).

УДК 621.534.23

Modeling of Three-Dimensional Thermo-Hydraulic Processes in VVER-1000 Reactor's Core with Program Complex TRETON \N.N. Davidenko, A.S. Korsun, Y.A. Maslov, I.G. Merinov, V.S. Kharitonov, B.E. Shumsky; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 13 pages, 8 illustrations. – References, 8 titles.

The improvement of porous body model for the description of heat-hydraulic processes in VVER-1000 reactors core with non-cover fuel assemblies has been done. Program complex TRETON for 3D-modelling non-stationary thermal and hydrodynamic processes has been created. Heat-hydraulic module TRETON has been tested by comparison of calculation results to the analytical decision of model heat transfer problem. Comparison of calculation results coolant temperature and speed for a nominal operating mode VVER-1000 reactors core with independent calculations under certified program NOSTRA has been spent.

УДК 621.039.517.5

Superposition Method in Modeling of Temperature Field in Heat Exchange Devices by Means of Tracer Concentration Field \V.N. Delnov, Y.D. Levchenko, S.F. Shepelev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 6 illustrations. – References, 7 titles.

The tracer is locally injected in turn into each characteristic area at the inlet of the flow part of the test section, while at the outlet the responses – tracer concentrations – are measured in the flow of working fluid. The local flow rate of tracer is proportional to the flux of thermal energy through the characteristic area. The sum of measured concentrations from each local tracer injection is proportional to local temperature at the outlet from the flow part of the test section. The application of response superposition method enables one to increase the accuracy in modeling the temperature field and simplify the design of test section for studying mixing processes in a heat exchange device.

УДК 621.039.564

Correlation Flowmeter for Measuring Low Coolant Velocities \B.V. Kebabdz, A.N. Opanasenko, V.A. Shurupov, M.S. Timchenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 10 pages, 3 tables, 9 illustrations. – References, 2 titles.

When modeling the heat emergency removing system of fast reactor on water test rig, the natural circulation velocity is evaluated by the thermocorrelation method. The calibration of the measuring channel for internal and external gap of model subassembly is carried out on a small test facility with forced circulation. The frequency range of signal processing is defined and correction factors for true flowrate calculation are obtained. The design improvement of model subassembly is proposed, in order to eliminate the swirl effect.

УДК 621.039.52.034.3: 532.546

Hydrodynamics and Heat Exchange Features of the Pebble Bed in Radial Coolant Flow \V.A. Klimova, V.M. Pahaluyev, S.Ye. Sheklein; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 5 pages, 4 illustrations. – References, 5 titles.

Regarded are the peculiarities of the radial flow in the pebble bed. The investigation shows that the spherical elements heat emission intensity is defined by the surface vortex generation as well as by gas flux laminarization connected with its accelerated flow. A rather simple formula for Nu number as a function of Re number in a range of $5 \cdot 10^2 - 10^4$ for the spherical elements diameter 7, 15 and 22 mm considering the geometrical parameter influence on the heat exchange is received.

УДК 681.51:621.039.534.6

Automatic Control System of Oxygen Thermodynamic Activity for Lead Bismuth Eutectic Coolant \P.N. Martynov, R.Sh. Askhadyllin, A.A. Simakov, V.S. Lanskix, M.E. Chernov, R.P. Sadovnichiy; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 6 illustrations. – References, 6 titles.

This article is devoted to develop of the oxygen thermodynamic activity automatic control system for circulating facilities with lead and lead-bismuth coolant. The basic preconditions for creation of the automatic control system and problem state of studying the oxygen rules with reference to the «SVBR-75/100» Reactor Installation are analyzed. For the first time, with reference to conditions of the «SVBR-75/100» Reactor Installation the opportunity of use of the oxygen thermodynamic activity automatic control system by a solid-