

АЭС. РД ЭО - 0186-00. – М.: Концерн “Росэнергоатом”, 2000.

12. РД 34.17.439-96. Методические указания по техническому диагностированию и продлению срока службы сосудов, работающих под давлением. – М.: 1996. – 56 с.

13. Положение о системе технического диагностирования паровых и водогрейных котлов промышленной энергетики. – М.: 1993. – 64 с.

14. Оборудование и трубопроводы АЭУ. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля. ПНАЭ Г-7-010-89.

15. Система неразрушающего контроля. Метод акустической эмиссии: Сборник документов. Серия 28 выпуск 2. М.: НТЦ по безопасности промышленности Госгортехнадзора России, 2001. – 220 с.

Получено 03.10.2005 г.

УДК: 621.039.55.001.57-52

Попов И.А.¹, Домашев Е.Д.²,
Сычев Е.Н.¹, Журавлев А.А.¹

¹Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

²Институт технической теплофизики НАН Украины

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА СБОРА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ АВАРИЙНЫХ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

У роботі дано короткий опис експериментальної установки і автоматизованої системи збору та обробки даних теплофізичних вимірів, показано особливості моделювання теплогідрравлічних процесів у замкнутому циркуляційному контурі високого тиску при стаціонарних, нестационарних і аварійних режимах. В експериментальній установці використовуються оригінальні оптичні методи виміру температури ТВЕЛ і паровмісту теплоносія.

В работе дано краткое описание экспериментальной установки и автоматизированной системы сбора и обработки данных теплофизических измерений, показаны особенности моделирования теплогидравлических процессов в замкнутом циркуляционном контуре высокого давления при стационарных, нестационарных и аварийных режимах. В экспериментальной установке используются оригинальные оптические методы измерения температуры ТВЭЛ и паросодержания теплоносителя.

The brief description of experimental equipment and automatic data processing system for thermophysics measurements are presented. The main features for thermohydraulic processes modeling in close mounted high pressure circulation circuit under stationary, transient and emergency conditions are showed. The experimental equipment is based on the original optical methods for heat-releasing element temperature and steam content of coolant measuring.

C_p – удельная теплоемкость жидкости;

P – давление;

Q – тепловая мощность;

q – плотность теплового потока;

Θ – предельная температура;

$St_{ж}$ – число Стантона;

T – температура;

t – время;

$t_{АЗ}$ – момент срабатывания;

w – скорость потока;

ϕ – паросодержание;

$\rho_{ж}$ – плотность жидкости;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

АЗ – аварийная защита;

ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор;
 НУ – нормирующий усилитель;
 САФЭ – система автоматизации физического эксперимента;
 СТЗ – система технического зрения;
 ТВС – тепловыделяющая сборка;
 ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент;
 УСИ – устройство сбора информации;

ФЭУ – фотоэлектрический умножитель;
 ЦН – циркуляционный насос;
 ЭУ – электронное устройство.

Индексы:

о – начальный;
 вх – на входе;
 ж – жидкость;
 s – насыщение.

Введение

В Севастопольском национальном университете ядерной энергии и промышленности разработана и построена экспериментальная установка для моделирования стационарных и нестационарных теплогидравлических процессов и вероятных аварийных режимов в кольцевой тепловыделяющей сборке водо-водяного энергетического ядерного реактора.

В экспериментальной установке применяются оптический датчик температуры, детектирующий тепловое излучение от внутренней полости тепловыделяющего элемента и оптический метод измерения паросодержания потока теплоносителя. Указанные методы измерений позволяют в реальном масштабе времени регистрировать чрезвычайно важные экспериментальные данные о быстрых переходных процессах в кольцевом канале тепловыделяющей сборки при кризисном и закризисном режимах.

1. Постановка задачи

Тяжелая авария водо-водяного энергетического реактора, вызванная разгерметизацией первого контура даже при своевременном сбросе аварийной защиты приводит к выбегу температуры ТВС, что может привести к плавлению оболочки ТВЭЛ или даже ее воспламенению при отсутствии достаточного охлаждения.

Проблема исследования теплофизических процессов при аварийных режимах в каналах активной зоны ВВЭР сводится к решению двух задач теплообмена: внутренней и внешней. Под внутренней задачей понимается оценка температурного поля ТВЭЛ, а решение внешней задачи сводится к определению структуры потока теп-

лоносителя, охлаждающего ТВЭЛ. К числу изучаемых относятся вопросы, связанные с определением границ начала интенсивного поверхностного кипения и начала объёмного кипения, идентификации кризиса кипения и исследования кинематических характеристик паровых пузырей при поверхностном и объёмном кипении.

Для разработки математических моделей состояния ТВС необходимы результаты экспериментальных исследований быстрых теплогидравлических процессов в ТВС при аварийных режимах, вызванных различными внешними и внутренними возмущениями (разгерметизация контура, высвобождение мощности, остановка циркуляционных насосов и др.) [1]. Обеспечение задач как физического, так и математического моделирования аварийных режимов в ТВС ВВЭР настоятельно требует создания специализированных экспериментальных теплофизических установок.

2. Краткое описание экспериментальной установки

Основой экспериментальной установки является циркуляционный контур высотой около 4 метров (рис. 1). В нижней части циркуляционного контура установки смонтирован экспериментальный участок 1, имеющий вид массивного кольцевого канала с центральным тепловыделяющим элементом. Кольцевой канал переходит в подъемный (тяговый) участок 2, на котором пароводяная смесь является подъемной силой при режимах с естественной циркуляцией. Верхняя часть тягового участка имеет компенсатор давления 3 и переливное устройство для отвода воды в опускной канал 4. В опускном канале поток воды проходит через теплообменник, охлаждаемый

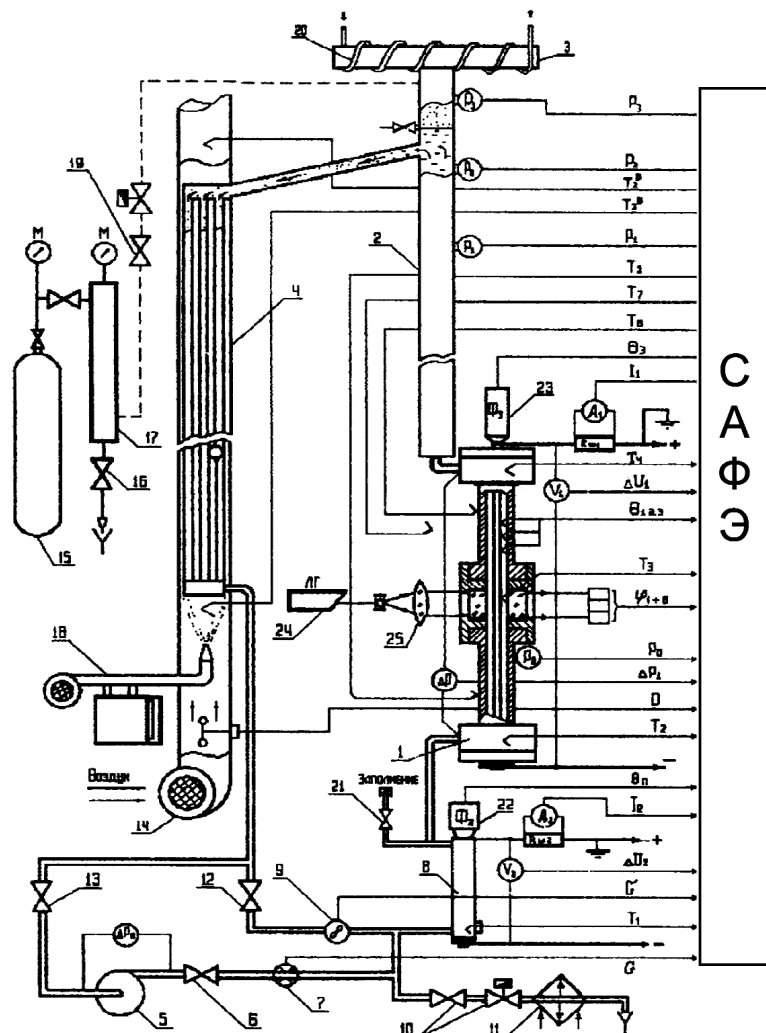


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

- 1 – экспериментальный участок; 2 – подъемный участок; 3 – компенсатор давления; 4 – опускной канал; 5 – циркуляционный насос; 6, 10, 12, 13, 16, 19, 21 – клапаны; 7 – дроссельная шайба; 8 – подогреватель; 9 – расходомер; 11 – охладитель; 14 – воздуходувка; 15 – баллон с азотом высокого давления; 17 – ресивер; 18 – распылитель воды; 20 – змеевик; 22, 23 – ФЭУ; 24 – источник света; 25 – линза; САФЭ – Система автоматизации физического эксперимента.

встречным потоком обычного или увлажненного воздуха. Охлаждение опускного потока воды воздухом способствует получению плавных динамических характеристик циркуляционного контура установки. После опускного канала поток воды попадает в циркуляционный насос 5. При естественной циркуляции поток теплоносителя имеет возможность проходить в обход циркуляционного насоса. Измерение расхода осуществляется с помощью датчиков расхода двух типов (трубка ВТИ или прецизионный датчик турбинного типа).

Главной особенностью кольцевого канала ТВС является наличие прозрачного участка, уплотненного в корпусе толстыми оптическими стеклами, рассчитанными на давление до 15,0 МПа. Луч света от источника, проходящий через прозрачный участок кольцевого канала, попадает на приемное устройство (детектор) и далее через аналого-цифровой преобразователь в ЭВМ. Данная оптико-электронная система, называемая системой технического зрения, предназначена для измерения истинного паросодержания в пароводяном потоке. С помощью этой системы

возможно изучение и измерение внутренних характеристик процессов кипения (показатели паросодержания и скольжения паровых пузырьков); изучение процессов конденсации паровых пузырьков в недогретой жидкости.

Методика измерения температуры тепловыделяющего элемента, как было сказано ранее, отличается от традиционно используемых методов и основана на измерении теплового излучения от внутренней полости ТВЭЛ. Для этого в верхней торцевой части экспериментального участка 1 установлен датчик измерения теплового излучения от горячего пятна внутренней полости ТВЭЛ. Сигнал датчика детектируется фотоэлектронным умножителем, усиливается и затем через АЦП поступает в ЭВМ. При достижении предельной температуры ТВЭЛ ($\Theta_{\text{пред}} = 650 \text{ }^\circ\text{C}$) срабатывает аварийная защита, отключающая электрическую цепь генератора тока нагревателя.

Экспериментальная установка отвечает современным требованиям и действует совместно с системой автоматизации физического эксперимента. Применение безынерционных оптических каналов измерения температуры ТВЭЛ и паросодержания теплоносителя позволяет с достаточной скоростью измерять и фиксировать опытные данные о процессах теплообмена в ТВС. Подобная измерительная информация может быть использована для определения вектора состояния безопасности ТВС.

3. Система автоматизации физического эксперимента

Краткая характеристика системы

При проведении теплофизического эксперимента, связанного с исследованием аварийных режимов, требуется регистрация многих быстроменяющихся параметров и оперативное управление состоянием установки со скоростью, которая находится за пределами возможностей человека. Для решения этих задач была разработана система автоматизированного сбора, обработки и хранения информации, которая может выполнять следующие функции:

- преобразование аналоговых сигналов средств измерений в цифровую форму и передачу цифрового кода ЭВМ;

- сбор, регистрацию и хранение экспериментальных данных;
- статистическую обработку и экспресс-анализ серий данных эксперимента;
- вывод данных на дисплей или другие средства вывода;
- автоматизированное управление экспериментом по разработанной программе.

Описываемая измерительная система получила название “Система автоматизации физического эксперимента”. САФЭ конструктивно представляет собой систему, состоящую из двух взаимодействующих ЭВМ – персональных компьютеров, аналого-цифрового преобразователя и устройства сбора информации от первичных датчиков-преобразователей.

Использование ЭВМ позволило:

- осуществить диалоговый режим управления работой установки;
- получить и накапливать экспериментальные данные от установки, осуществлять коррекцию с целью уменьшения погрешностей измерительного тракта;
- обрабатывать данные в соответствии с заданным алгоритмом;
- производить тестирование системы;
- вести базы данных, готовить и редактировать протоколы исследований.

Оператор САФЭ может в диалоговом режиме задать или выбрать:

- вид аварийного режима (разрыв контура, остановка ЦН, высвобождение большой тепловой мощности, воздействие набросов и сбросов давления);
- значение скорости наброса или сброса тепловой нагрузки на ТВЭЛ;
- значение предельной температуры ТВЭЛ;
- количество измеряемых параметров и частоту опроса датчиков;
- продолжительность периода накопления данных.

Предварительная обработка данных по выбранному параметру включает в себя выбор интервала дискретности изменения параметров и расчет полного набора статистических характеристик.

В ходе теплофизического эксперимента осуществляется сбор информации в течение назна-

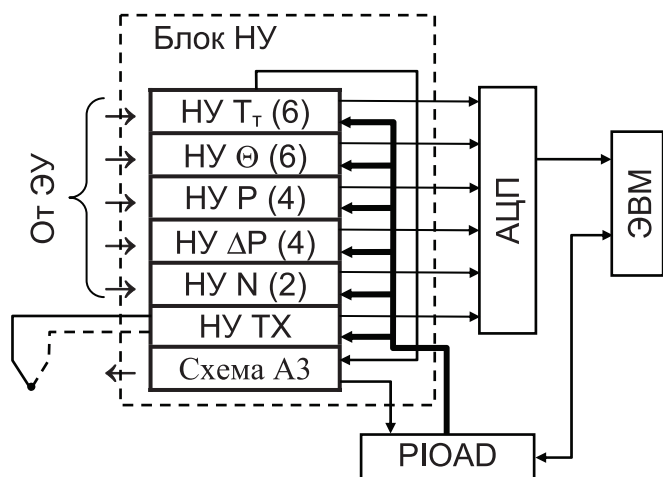


Рис. 2. Структурная схема САФЭ (канал измерения паросодержания не показан).

чаемого периода времени с заданным интервалом повторения серии следующих операций:

- опрос измерительных датчиков установки и преобразование сигналов датчиков в значения соответствующих физических величин;
- цифровое и графическое отображение исследуемых и эксплуатационных параметров на дисплее;
- запись информации от датчиков и данных о режиме работы установки на внешние носители для долговременного хранения.

Общая организация вычислительного процесса

Структурная схема системы автоматизации физического эксперимента имеет вид, показанный на рис. 2.

В состав системы входят программное обеспечение и аппаратные средства (блок нормирующих усилителей, ЭВМ, модули АЦП и PIOAD).

Аппаратные средства САФЭ обеспечивают сбор данных от экспериментальной установки. Выходные аналоговые сигналы от установки – меняющиеся значения напряжений и токов от первичных датчиков – сначала поступают на входы блока нормирующих усилителей. В блоке НУ выполняются преобразования входных сигналов вида: “напряжение – напряжение” и “ток – напряжение” и усиление преобразованных сигналов с приведением диапазона их изменения к диапазону преобразования АЦП и подавлением синфазных помех. В соответствии с имеющимися датчиками установки все НУ разделены на следующие группы:

- НУ T_r , НУ Θ – НУ для датчиков температур теплоносителя и ТВЭЛ (по 6 шт.);
- НУ Р, НУ ΔP – НУ для датчиков давления и перепада давления (по 4 шт.);
- НУ N – НУ для датчиков мощности (2 шт.);
- НУ ТХ – НУ для датчика температуры холодного спая термопар (соответствует температуре окружающей среды).

После усиления сигналы из блока НУ подаются на входы модуля многофункционального 16-канального многопредельного 12-разрядного АЦП, из которого оцифрованные данные поступают в ЭВМ. Управление коммутацией каналов НУ осуществляется ЭВМ через модуль адаптера параллельного ввода-вывода PIOAD (Parallel Input/Output Adapter).

Схема выработки сигнала аварийной защиты от пережога ТВЭЛ также находится в блоке НУ. Срабатывание АЗ может происходить по сигналу от любой из термопар, измеряющих температуру оболочки ТВЭЛ, или по сигналу от детектора теплового излучения ТВЭЛ.

Тестирование детектора теплового излучения ТВЭЛ при изменении удельной тепловой нагрузки ТВЭЛ в пределах $(2...5)10^6$ Вт/м² показало практическую безынерционность данного измерительного канала. На рис. 3 приведены графики изменения подвода электрической мощности к ТВС (Q) и температуры ТВЭЛ (Θ) при различных значениях плотности теплового потока (q) через стенку ТВЭЛ и температуры теплоносителя ($T_{вх}$) на входе в ТВС. При достижении предельной температуры ТВЭЛ происходит не мгновенное отключение, а экспоненциальное снижение подводимой мощности. Как видно из рис. 3, в каждом из опытов имеет место выбег температуры ТВЭЛ после отключения тепловой нагрузки. На исследуемых температурных кривых (Θ) заметно влияние процесса конденсации паровых включений, отражающее кризисные и закризисные состояния. Длительность переходных процессов составляет порядка 0,1 с.

4. Анализ экспериментальных данных

Проведенные на экспериментальной установке исследования показали, что в системе “поток теплоносителя – стенка ТВЭЛ” имеют место режимы пленочного кипения. При этом, поскольку стенка

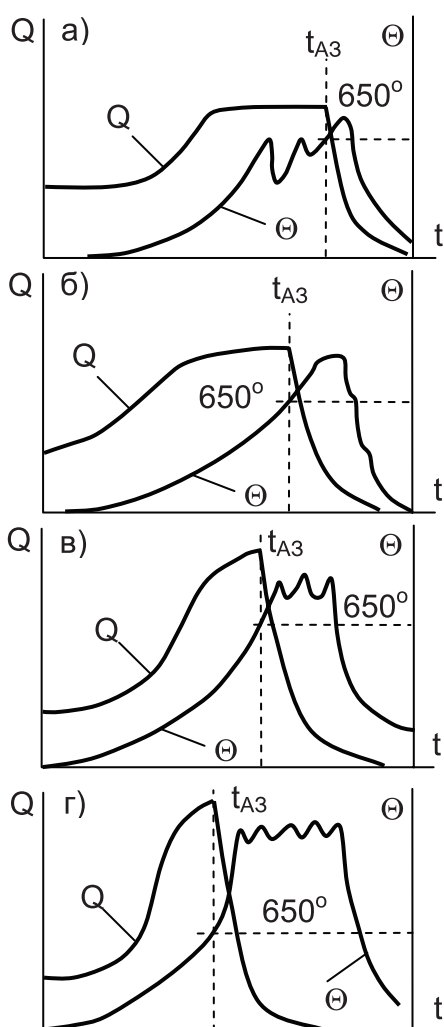


Рис. 3. Динамика воздействия тепловой мощности (Q) на температуру ТВЭЛ (Θ):

- t_{A3} – момент срабатывания АЗ при $\Theta = 650^\circ\text{C}$,
 а) $P_0 = 2,5 \text{ МПа}$, $q = 3,2 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$, $T_{\text{вх}} = 197^\circ\text{C}$;
 б) $P_0 = 1,5 \text{ МПа}$, $q = 3,57 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$, $T_{\text{вх}} = 186^\circ\text{C}$;
 в) $P_0 = 0,92 \text{ МПа}$, $q = 3,73 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$, $T_{\text{вх}} = 133^\circ\text{C}$;
 г) $P_0 = 0,2 \text{ МПа}$, $q = 4,16 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$, $T_{\text{вх}} = 112^\circ\text{C}$.

ТВЭЛ является тонкой, то с достаточной степенью точности можно пренебречь изменением температуры по толщине стенки и перетоками теплоты по длине ТВЭЛ. В результате уравнение баланса теплоты для стенки ТВЭЛ может быть записано с использованием числа Стантона ($St_{\text{ж}}$) в форме [2]:

$$St_{\text{ж}} = q_{\text{ст}} / [c_p \rho_{\text{ж}} w_{\text{ж}} (T_s - T_{\text{ж}})]. \quad (1)$$

В результате обработки опытных данных по формуле (1) получены графики (рис. 4), характе-

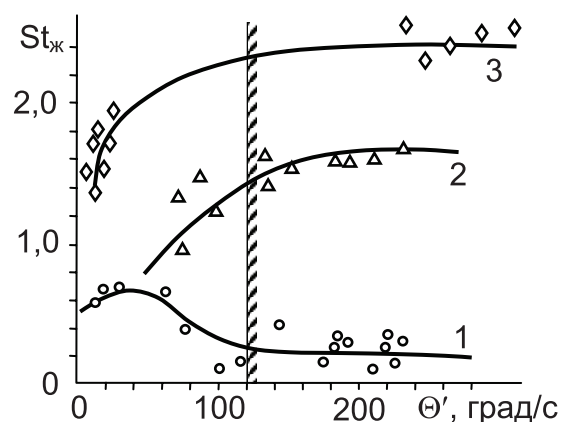


Рис. 4. Зависимость $St_{\text{ж}} = f(\Theta')$:
 1 – $P = 2,5 \text{ МПа}$; 2 – $1,5$; 3 – $0,2$.

ризующие зависимость безразмерного теплового потока ($St_{\text{ж}}$) от скорости изменения температуры ТВЭЛ (Θ') в диапазоне давлений $0,2 \dots 2,5 \text{ МПа}$ [3].

Результаты проведенных исследований позволяют дать ответ на один из спорных вопросов теории кипения – оказывает ли влияние скорость нагрева стенки ($\Theta' = d\Theta/dt$) на теплообмен в областях переходного и пленочного режимов кипения. В наших экспериментах темп нагрева и охлаждения стенки достигал значений $\Theta \geq 8000 \text{ град/с}$ (рис. 4). Это значение на порядок выше, чем в опытах, выполненных в работе [2], авторы которой пришли к выводу об отсутствии влияния степени нестационарности (скорости изменения температуры ТВЭЛ Θ') на режим пленочного кипения. Кроме того, в наших экспериментах применение быстродействующей ($t \sim 10^{-5} \text{ с}$) системы измерения температуры ТВЭЛ позволило избежать динамических ошибок в измерении темпа нагрева ТВЭЛ.

Как следует из рис. 4, поле опытных данных делится на две области условной границей $\Theta' = 1200 \text{ град/с}$. В левой области имеют место значительные изменения критерия $St_{\text{ж}}$ в зависимости от скорости изменения температуры стенки ТВЭЛ. В правой области критерий $St_{\text{ж}}$ практически не зависит от скорости изменения температуры оболочки ТВЭЛ. Эта область относится к пленочному режиму кипения, который характерен для большинства аварийных ситуаций.

Выводы

1. Постоянство числа Стантона, полученное из наших опытов при условии $\Theta' > 8000 \text{ град/с}$,

говорит о пленочном характере режима кипения при температуре ТВЭЛ, равной 650...700 °С и более. Это обстоятельство в одномерном приближении моделирования краевой задачи теплообмена в одиночном канале может быть интерпретировано как независимость от тепловых граничных условий.

2. Экспериментальная установка может быть использована для исследования теплогидравлических процессов при кипении, кризисе кипения и закризисных режимах в широких диапазонах значений давления P (0,1...15,0 МПа), теплового потока q ((0,1...5) 10^6 Вт/м²) и паросодержания ϕ (0,01...0,9).

3. Система автоматизации эксперимента и оригинальные оптические системы измерения температуры ТВЭЛ и паросодержания теплоносителя создают новые возможности для исследо-

вания теплофизических процессов в аварийных режимах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лабунцов Д.А., Муратова Т.М. О моделировании аварий в системах ЯЭУ. //Теплоэнергетика. – 1992. – № 10. – С. 18–22.
2. Кошкин В.Х, Каменин Э.К. и др. Нестационарный теплообмен. – М.: Машиностроение, 1973. – 316 с.
3. Попов И.А., Сайда Д.М., Быковский Ю.М. Оценка безопасности и управления ТВС ядерного реактора по кривой кипения. В кн. “Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР”. Тр. международ. конф., т.1, Обнинск, 1995, С.107-116.

Получено 25.11.2005 г.