

На правах рукописи

Костанбаев Сергей Витальевич

РАСЧЕТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ РАСХОДА
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В КАНАЛЕ РЕАКТОРА РБМК ПО ИНФОРМАЦИИ О
НАВЕДЕННОЙ АКТИВНОСТИ

05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование,
эксплуатацию и вывод из эксплуатации.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор _____

МОСКВА - 2010

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете
«МИФИ»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Загребаев А.М., НИЯУ МИФИ

Официальные оппоненты: доктор технических наук, зав. лабораторией
Федосов А.М., РНЦ «Курчатовский институт»

кандидат физико-математических наук,
доцент Савандер В.И., НИЯУ МИФИ

Ведущая организация: Научно-исследовательский и
конструкторский институт
энерготехники (НИКИЭТ)

Защита диссертации состоится 30 июня 2010 г. в 16 часов 30 минут на заседании
диссертационного совета Д212.130.04 в НИЯУ МИФИ по адресу:
115409, Москва, Каширское ш., 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан " ____ " мая 2010 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре,
заверенный печатью организации.

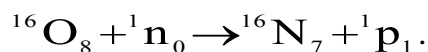
Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук, профессор

Чернов И.И.

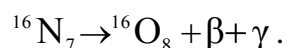
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из условий безопасной работы ядерного реактора РБМК является надежный отвод тепла от тепловыделяющей сборки (ТВС), что обеспечивается определенным соотношением между мощностью ТВС и расходом теплоносителя через технологический канал. Важнейшую роль при этом играет контроль за расходом теплоносителя. Штатный контроль расхода теплоносителя через топливный канал (ТК) осуществляют шариковые расходомеры ШТОРМ-32М, расположенные на трубопроводах водяных коммуникаций, по которым теплоноситель поступает на вход в каждый ТК реактора. В процессе эксплуатации шариковых расходомеров возрастает погрешность определения расхода из-за постепенного механического износа шарика и дорожки качения, изменения режима течения и др. В практике эксплуатации реакторов РБМК возникают ситуации, при которых некоторые расходомеры выходят из строя либо их показаниям нельзя доверять, то есть появляются "запрещенные" расходомеры. Это обстоятельство накладывает дополнительные ограничения на режим эксплуатации реактора, в том числе при проведении перегрузок топлива или подъеме мощности после кратковременных остановок.

По этой причине является актуальным определение значения расхода в топливном канале с «запрещенным» расходомером независимым от штатного способом. Такой способ существует благодаря активации водного теплоносителя в активной зоне:



Радионуклид ^{16}N испускает гамма-кванты с энергиями 6,13–7,11 и 2,75 МэВ:



Для измерения γ -активности теплоносителя может быть использована система контроля герметичности оболочки твэлов (СКГО), которая в энергетическом диапазоне выше 3,5 МэВ фиксирует наведенную активность теплоносителя.

Наведенная активность воды в активной зоне (АЗ) зависит от величины плотности потока быстрых нейтронов, т.е. от мощности, а в точке измерения радиоактивности – от времени доставки, т.е. при известном расстоянии – от расхода теплоносителя. Таким образом, величина «азотной» активности теплоносителя несет в себе информацию и о мощности, и о расходе теплоносителя.

Этот факт привлек внимание исследователей применительно к корпусным реакторам с водой под давлением, и в настоящее время радиационный метод успешно реализован за рубежом в качестве штатных и дополнительных систем контроля на реакторах этого типа.

Успешное использование информации об «азотной» активности однофазного теплоносителя на реакторах типа PWR инициировало исследователей на изучение возможности ее использования применительно к реакторам РБМК с кипящим теплоно-

сителем. Конструктивные особенности системы регистрации активности и кипение теплоносителя в топливном канале потребовали разработки новых подходов к решению задачи восстановления расхода в каналах реактора типа РБМК. В работах других авторов была показана принципиальная возможность определения расхода теплоносителя по информации об его активности. Однако не было создано действующего программного обеспечения, адаптированного к реальным информационным каналам АЭС. Вместе с тем отметим, что на ряде АЭС, например, Курской, сбор информации, предоставляемой системой КГО, автоматизирован. Это обстоятельство в существенной степени влияет на практическую возможность определения расхода по измеренной «азотной» активности, поскольку позволяет использовать современную вычислительную технику, следовательно, и мощные математические модели и алгоритмы.

Поэтому актуальной является разработка и внедрение математического обеспечения контроля расхода воды в технологическом канале реактора РБМК на основе информации системы КГО.

Цель работы – повышение безопасности эксплуатации реактора РБМК за счет разработки и внедрения расчетно-измерительного комплекса контроля расхода воды в технологическом канале реактора РБМК на основе информации о наведенной активности теплоносителя.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие основные задачи:

- адаптирована к реальным условиям эксплуатации математическая модель активации теплоносителя в канале реактора РБМК;
- разработаны алгоритмы первичной обработки информации и настройки математической модели;
- разработан программный комплекс, связанный по информационным каналам с базами данных технологических параметров атомной станции;
- проведены испытания, опытная эксплуатация и метрологическая аттестация комплекса.

Объектом исследования является ядерный энергетический реактор РБМК-1000.

Предметом исследования является методика определения расхода теплоносителя ядерного энергетического реактора РБМК-1000 по наведенной активности.

Научная новизна работы

- разработана математическая модель активации теплоносителя в технологическом канале реактора РБМК;
- разработана методика восстановления расхода по данным системы КГО и информации системы централизованного контроля энергоблока;
- разработаны алгоритмы первичной обработки сигналов КГО;

- разработаны алгоритмы адаптации модели и идентификации расхода теплоносителя;
- создан расчетно-измерительный комплекс, реализующий предложенные алгоритмы определения расхода теплоносителя через канал.

Практическая значимость работы заключается в том, что создан и внедрен в опытную эксплуатацию на Курской АЭС на первом энергоблоке расчетно-измерительный комплекс, позволяющий определять расход теплоносителя в технологическом канале при отказе штатного расходомера.

Основные положения, выносимые защиту.

- разработанная математическая модель активации теплоносителя в технологическом канале реактора РБМК;
- разработанная методика определения расхода теплоносителя в технологическом канале РБМК по информации об азотной активности;
- разработанная методика определения расхода теплоносителя в технологическом канале РБМК по информации о перепаде давления по тракту;
- разработанные структура и принцип функционирования расчетно-измерительного комплекса;
- созданное программное и алгоритмическое обеспечение расчетно-измерительного комплекса для определения расхода теплоносителя по данным системы КГО;
- результаты опытной эксплуатации расчетно-измерительного комплекса.

Достоверность научных положений, результатов и выводов основана на применении корректных математических моделей, сравнении результатов моделирования с экспериментальными данными, результатах метрологической аттестации методики выполнения измерений.

Личный вклад автора. Все результаты, представленные в диссертации, получены лично автором либо при его непосредственном участии. Автор принимал участие в разработке методики определения расхода в запрещенном расходомере по данным об азотной активности. Непосредственно автором были разработаны алгоритмы первичной обработки технологической информации, а также весь программный комплекс.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на конференциях МИФИ (2005, 2010); на международном научно-техническом семинаре «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» (Алушта, 2007, 2008); на XV семинаре по проблемам физики реакторов (Москва, 2008), Молодежной конференции «Знания молодых ядерщиков – атомным станциям» (Обнинск 2007), на седьмой Курчатовской молодежной конференции (Москва, 2009), на научных семинарах в МИФИ, НИКИЭТ, ВНИИАЭС, на курсах подготовки персонала АЭС с реакторами РБМК-1000.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 работ в научных журналах и сборниках трудов международных и российских конференций и семинаров, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 150 стр., содержит 98 рис, 47 таблиц, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы из 73 наименований и 4 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности работы, сформулирована цель, показана практическая значимость полученных результатов и всей работы в целом, а также приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации проанализированы достоинства и недостатки штатных методов контроля поканального расхода теплоносителя в ядерном реакторе РБМК. Рассмотрены принципы, известные методики и алгоритмы радиационного метода контроля расхода теплоносителя в ядерных реакторах. Особое внимание уделено математическим моделям процесса активации теплоносителя и их использованию для восстановления теплотехнических параметров канала. На основе критического анализа известных подходов поставлена задача определения расхода в топливном канале реактора РБМК радиационным методом на основе данных системы КГО.

Во второй главе приведены разработанная автором применительно к реальным условиям эксплуатации методика определения расхода теплоносителя по данным СКГО в технологическом канале реактора РБМК. В основе методики лежит математическая модель активации теплоносителя в топливном канале реактора РБМК, представляющая собой систему следующих дифференциальных уравнений.

В активной зоне:

$$\frac{d(SN\omega)}{dz} = A(W + \alpha \bar{W}_0)S(z)\rho(z) - \lambda N(z)S(z) , \quad (1)$$

в пароводяной коммуникации:

$$\frac{d(N'S'\omega')}{dz} = -\lambda N'S'(z) . \quad (2)$$

Условия однозначности: концентрация азота на входе в активную зону ($z = 0$)

$$N(0) = 0 . \quad (3)$$

Условие непрерывности потока ядер азота на границе активной зоны и ПВК ($z = H$)

$$NS\omega = N'\omega'S . \quad (4)$$

Показания датчика СКГО пропорциональны концентрации азота на конце ПВК, равной $N'(L)$.

Использованы обозначения:

A – переводной коэффициент, $\frac{1}{\text{Дж} \cdot \text{кг}}$;

N – плотность ядер азота в активной зоне, м^{-3} ;

N' – плотность ядер азота на ПВК, м^{-3} ;

z – координата по высоте АЗ и ПВК, м;

$S(z)$ – проходное сечение ТК или ПВК, м^2 ;

W – мощность ТК, МВт;

\bar{W}_0 – средняя мощность окружения ТК, МВт;

$\lambda = 0,101 \text{ с}^{-1}$ – постоянная распада ядер азота;

$\rho(z)$ – плотность пароводяной смеси, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$\omega(z)$ – скорость смеси в активной зоне, м/с;

$\omega'(z)$ – скорость смеси на ПВК, м/с;

H – высота АЗ, м;

L – длина ПВК, м;

α – доля быстрых нейтронов из соседних каналов окружения.

Функции $\omega(z)$, $\rho(z)$ определяются в результате теплогидравлического расчета по известной программе «ГИДРА».

Уравнения имеют следующий физический смысл. В активной зоне изменение потока ядер азота между сечениями $S(z)$ и $S(z + dz)$ обусловлено прибылью ядер азота за счет активации ядер кислорода как быстрыми нейтронами, рожденными в самом канале, так и быстрыми нейтронами ближайшего окружения и убылью за счет распада ядер азота. На пароводяной коммуникации изменение потока ядер азота обусловлено только распадом азота.

Поскольку математическая модель не может учесть все индивидуальные особенности ТК, например, изменение проходных сечений за счет различного рода отложений, она подвергается настройке на каждый топливный канал следующим образом.

На момент настройки модели в момент времени t для каждого ТК предполагаются известными измеренное значение активности $N_3(t)$, мощность $W(t)$, длина ПВК (постоянная), расход по штатной системе «Шторм-32М» - $G_{\text{шт}}(t)$. Находится отношение

$\xi(t) = \frac{N_3(t)}{N'(W(t), G_{\text{шт}}(t), L)}$. Считается, что этот индивидуальный для каждого ТК на-

строечный коэффициент (коэффициент адаптации) не меняется в течение времени Δt . После настройки модели определяется расход $G(t + \Delta t)$ в момент времени $t + \Delta t$ из решения уравнения:

$$\frac{N_3(t + \Delta t)}{\xi(t)} = N'(W(t + \Delta t), G(t + \Delta t), L). \quad (5)$$

Таким образом, если в интервале времени Δt после настройки модели отказал расходомер, то значение расхода теплоносителя может быть определено при известной мощности ТК и измеренному значению активности теплоносителя. Настройке модели уделялось особое внимание. Рассматривались различные способы определения коэффициента адаптации: по одному временному срезу, по нескольким временным срезам. При этом использовались методы цифровой фильтрации: скользящего среднего, экспоненциального сглаживания и др. Исследования показали, что оптимальным является экспоненциальное сглаживание: $S = a \sum_{i=0}^{N-1} (1-a)^i x_{N-i} + (1-a)^N x_0$, где N – количество временных срезов, a – параметр фильтрации, x_i – исходные значения, S – сглаженное значение. При этом оптимальное количество временных срезов, обрабатываемых фильтром, зависит от временного шага между ними. Например, если опрос системы КГО проводится раз в 2 недели, то оптимальным является привлечение двух последних срезов. Расчетные исследования показали, что наибольший вклад в погрешность определения расхода теплоносителя вносит погрешность в измерении активности теплоносителя. По этой причине важным является корректная первичная обработка экспериментальной информации системы КГО.

Конструктивно система КГО состоит из восьми сдвоенных коллиматоров с блоками детектирования, установленных на тележках и с помощью системы перемещения передвигающихся в восьми коробах, которые расположены вдоль вертикальных рядов трубопроводов пароводяных коммуникаций. С каждой стороны короба расположено до 115 трубопроводов, объединенных в нитку. Всего ниток 16. Коллимационные отверстия детекторов направлены в противоположные стороны, и поэтому каждый детектор может контролировать по одному ряду трубопроводов. Коллимационные отверстия расположены таким образом и имеют такую конфигурацию, что при движении детектора вдоль рядов трубопроводов на кристалл каждого блока детектирования в основном попадают γ -кванты от трубопровода, напротив которого находится в данный момент отверстие коллиматора. При движении тележки системы КГО расположенный на ней датчик регистрирует γ -излучение через равные промежутки времени, осуществляет «прописку» (рис. 1). Максимальное значение сигнала в каждом пике соответствует суммарной активности теплоносителя и окружающего оборудования (барабана-сепаратора, металлоконструкций и др.). Сигналы с блоков детектирования по высокочастотным кабелям подаются на сигнально-измерительную аппаратуру. Значение активности в каналах с дополнительным поглотителем меньше и обусловлено активацией за счет быстрых нейтронов, рожденных в ТВС соседних каналов. Также могут встречаться неразведенные ПВК.

В работе решалась задача фильтрации полезного сигнала, задача нормировки сигналов КГО, поскольку датчики на каждой тележке КГО могут быть откалиброваны

по-разному, наконец, задача определения значения активности в пике сигнала. Последнее делалось следующим образом.

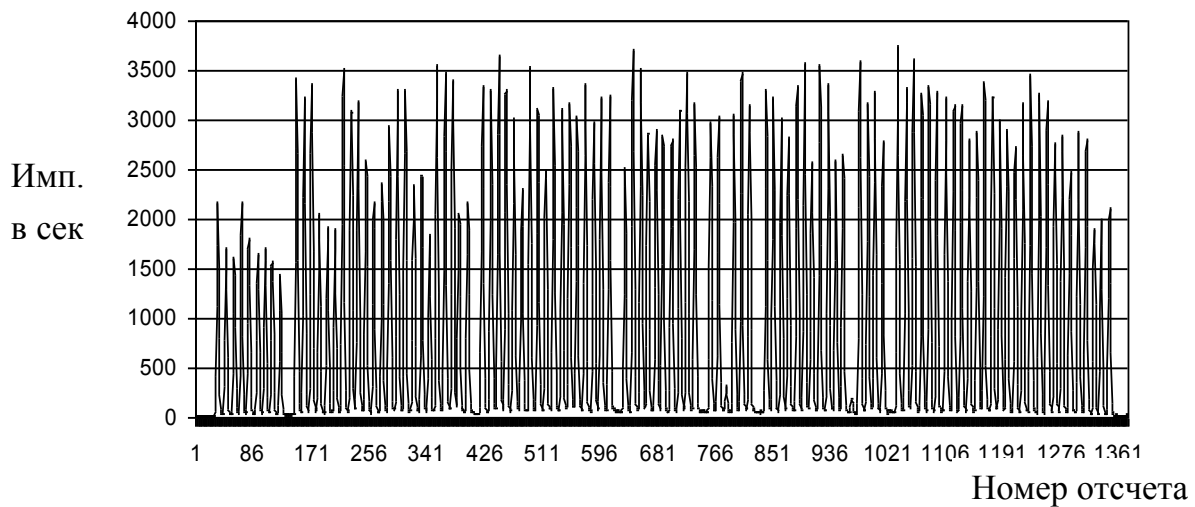


Рис. 1. Прописка в азотном окне.

Принимая во внимание то, что период дискретизации сигнала датчика КГО может меняться, как и скорость тележки с датчиками, требуется определение эффективного расстояния между отчетами максимумов ПВК. Для этого строится автокорреляционная функция $A(i) = \sum_{j=i}^{N-1} (x_j - \bar{x})(x_{j-i} - \bar{x})$. На рис. 2 показан вид относительной автокорреляционной функции $\frac{A(i)}{A(0)}$.

Положения локальных максимумов m_k этой функции (поиск нового максимума осуществляется при переходе функции через ноль) как раз будут отвечать расстоянию между k максимумами азотной прописки. Для нахождения эффективного расстояния m_{eff} производится усреднение расстояния между соседними максимумами из первой половины автокорреляционной функции (это обусловлено тем, что в самой прописки присутствуют начальные и конечные участки, при которых «хвост» автокорреляционной функции будет иметь другую структуру):

$m_{eff} = \sum_{i=0}^{K:m_k < N/2} \frac{\Delta m_i}{K}$. Для поиска первого максимума строится корреляционная функция

от азотной прописки и функции $G(i) = \begin{cases} 0,4m_{eff} - |i|, & |i| < 0,4m_{eff} \\ 0, & |i| \geq 0,4m_{eff} \end{cases}$. Первый максимум m_f в

азотной прописке будет соответствовать первому локальному максимуму

$Q(i) = \sum_{j=-0,4m_{eff}}^{0,4m_{eff}} G(i)(x_{j-i})$. Тогда положение остальных максимумов азотной прописки определяются начальным положением и кратным эффективным сдвигом:

$M(i) = m_f + im_{eff}$. Для более точного определения просматривается граница $0,2m_{eff}$ от точки $M(i)$. Также существует процедура проверки правильности разбора, прове-

ряющая найденное количество максимумов и, зная схему разводки ПВК, можно сказать, в каких каналах должен быть высокий уровень или низкий уровень (столб воды, дополнительный поглотитель или нет ПВК). Для каждого несоответствия приписывается значение штрафа и впоследствии определяется значение штрафа для всей ПВК. Превышение значения штрафа некоторого порогового значения свидетельствует о возможно неправильной разборке и используется для принятия решения о пригодности данной азотной прописки в расчете.

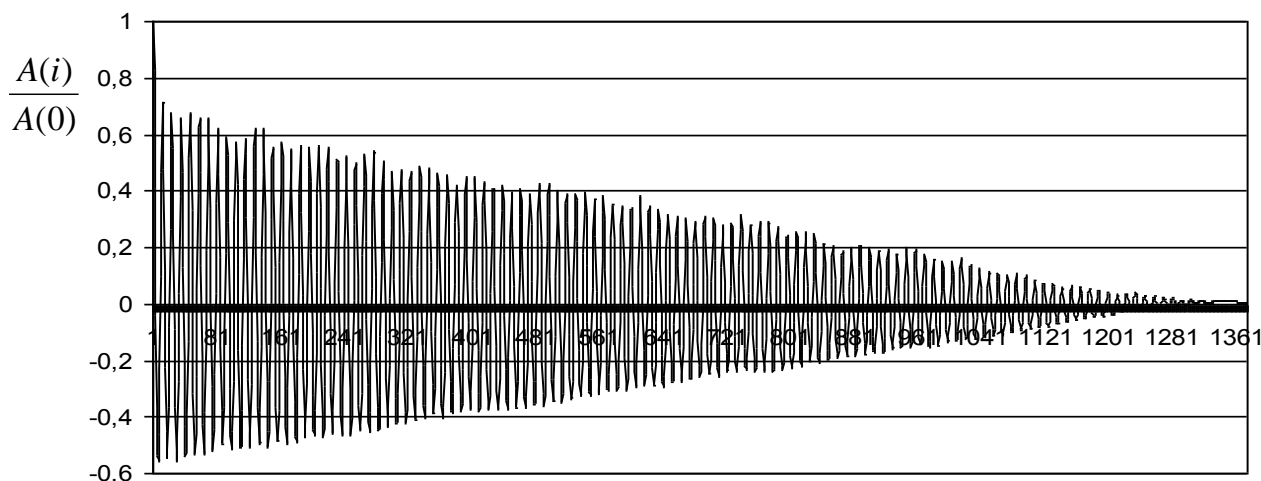


Рис. 2. Нормированная автокорреляционная функция азотной прописки:
по оси X номер отсчета.

Дополнительно к описанному выше способу контроля расхода на основе информации об активности теплоносителя в расчетно-измерительном комплексе реализована возможность определения расхода по расчетной гидродинамической характеристике канала и перепаду давления между напорным коллектором и барабаном-сепаратором. Перепад давлений для каждого канала можно записать следующим образом:

$$\Delta P = \Delta P(G_i, W_i) + k_i G_i^2, \quad (6)$$

где $\Delta P(G_i, W_i)$ – расчетный перепад давлений в канале без учета степени открытия запорно-регулирующего клапана (ЗРК), $k_i G_i^2$ – потеря давления на местном сопротивлении, обусловленная степенью закрытия ЗРК, k_i – некоторый коэффициент, учитывающий местное сопротивление на ЗРК.

Таким образом, зная коэффициенты k_i , при известном перепаде давлений ΔP можно определить один из параметров (G_i или W_i) при заданном значении другого параметра.

Алгоритм восстановления параметров по перепаду давлений в своих существенных чертах повторяет описанный выше алгоритм восстановления по «азотной» активности. А именно, на первом временном шаге (временном «срезе») считая извест-

ными мощность, расход и перепад давления для каждого канала определяется коэффициент k_i . Затем на следующем временном «срезе» считая k_i известными при известной мощности канала и измеренном перепаде давления, из уравнения (6) находится расход теплоносителя.

Алгоритм восстановления расходов по перепаду давления позволяет восстанавливать расход в тех каналах, где не происходило резкого изменения теплогидравлического сопротивления (изменения степени открытия ЗРК).

Сравнение результатов восстановления расхода по различным алгоритмам (по данным об азотной активности и по перепаду давления) позволяет решать задачу диагностики работоспособности расходомеров. Действительно, если существуют каналы, где оба алгоритма дают расхождение по сравнению со штатными средствами, это может служить указанием на возможную неисправность расходомера.

В расчетно-измерительном комплексе реализован алгоритм идентификации потенциально неисправных расходомеров.

В алгоритме рассматривается отношение коэффициентов адаптации математических моделей

$$\tilde{\Psi}_i = \frac{\left(\frac{\xi_i(t)}{\bar{\xi}_i} - 1 \right) \cdot \left(\frac{k_i(t)}{\bar{k}_i} - 1 \right)}{\mu^2}, \quad (8)$$

где $\bar{\xi}_i$ и \bar{k}_i – средние за предшествующий период наблюдений коэффициенты адаптации математических моделей, μ – некоторое пороговое значение.

Отметим еще одну возможность совместного использования математической модели перепада давлений и активности теплоносителя. Поскольку в реакторе типа РБМК осуществляется режим непрерывных перегрузок топлива, то это приводит к необходимости несколько раз за время работы тепловыделяющей сборки изменять расход, то есть воздействовать на ЗРК. Степень открытия ЗРК в настоящее время изменяется вручную, о чем, в соответствующем журнале делается запись, и данные записываются в файл. В практике эксплуатации были ситуации, когда на этом этапе либо совершались ошибки, либо фиксация состояния ЗРК опаздывала по времени. Например, на рис. 3 видно явное несоответствие степени открытия ЗРК и изменения расхода теплоносителя для одного из топливных каналов первого энергоблока Курской АЭС.

Поскольку сами штатные расходомеры имеют погрешность и могут выходить из строя, то неопределенность в степени открытия ЗРК осложняет анализ сложившейся ситуации. Действительно, из приведенного выше рисунка невозможно сделать заключение о том реально ли изменился расход и устарели данные о степени открытия ЗРК или расходомер дает неверные значения.

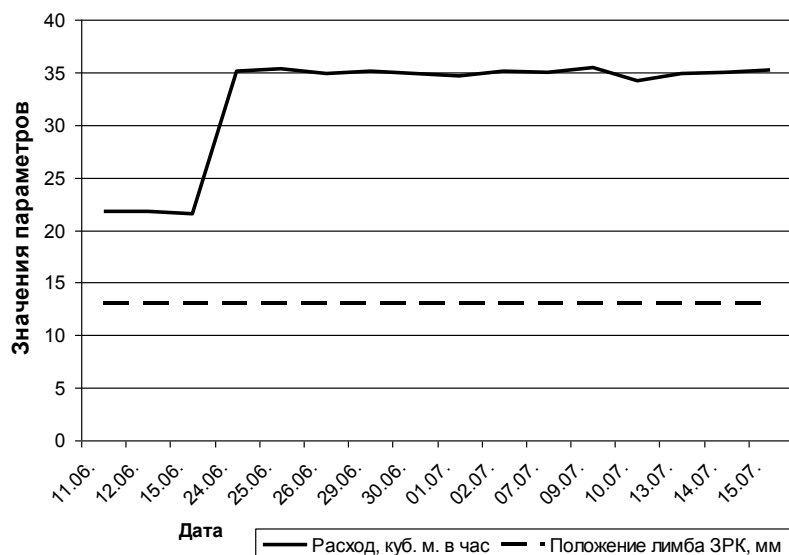


Рис. 3. Изменение расхода и степени открытия ЗРК.

Учитывая, что изменение коэффициента k_i безынерционно отслеживает изменение степени открытия ЗРК (например, на рис. 4 показаны относительные отклонения расхода и коэффициента местного сопротивления для одного из каналов), предлагается организовать получение оперативной информации об изменении степени открытия ЗРК на основе совместного использования информации об активности теплоносителя и перепаде давления по тракту.

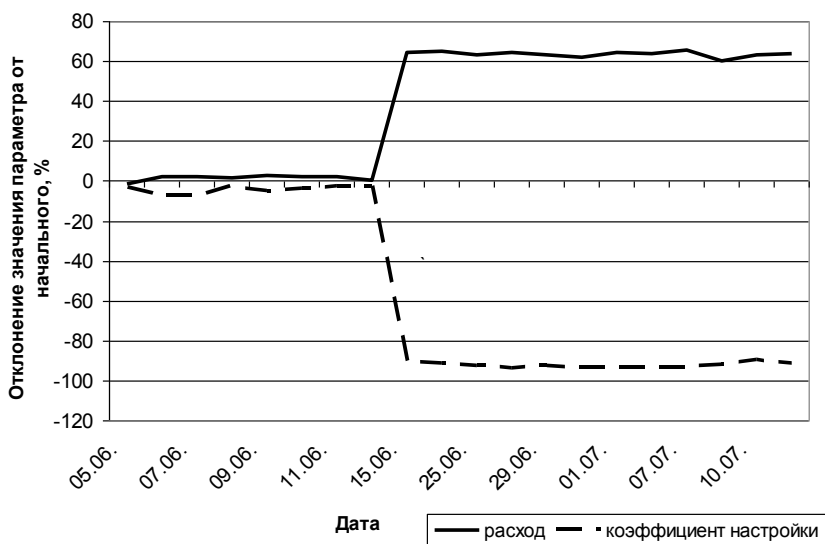


Рис. 4. Изменение расхода и коэффициента настройки.

Проверка данной схемы в процессе опытной эксплуатации на первом энергоблоке Курской АЭС показала свою работоспособность. Всего за время опытной эксплуатации в период с мая по июль 2009 г. было выявлено пять несоответствий между степенью открытия ЗРК и измеренным расходом.

В главе 3 описан созданный автором расчетно-измерительный комплекс контроля расхода теплоносителя (РИК - КРТ), реализующий изложенные выше методики.

Расчетно-измерительный комплекс имеет универсальную структуру и состоит из базовой библиотеки работы с данными, дополнительных модулей преобразований и модулей отображения (рис. 5). Весь программный комплекс написан на языке C# с использованием .NET 2.0, работает в системах Windows и Linux. Для работы в системах Linux необходимо использовать систему MONO версии не ниже 2.4. Библиотека работы с данными предназначена для абстрактной работы с данными и взаимодействия с системой управления базами данных (СУБД). Сюда также вынесена вся логика пересчета одной системы задания реакторной ячейки в другую, алгоритмы проверки целостности задания данных, например, что ячейка с таким номером действительно существует и прочее.

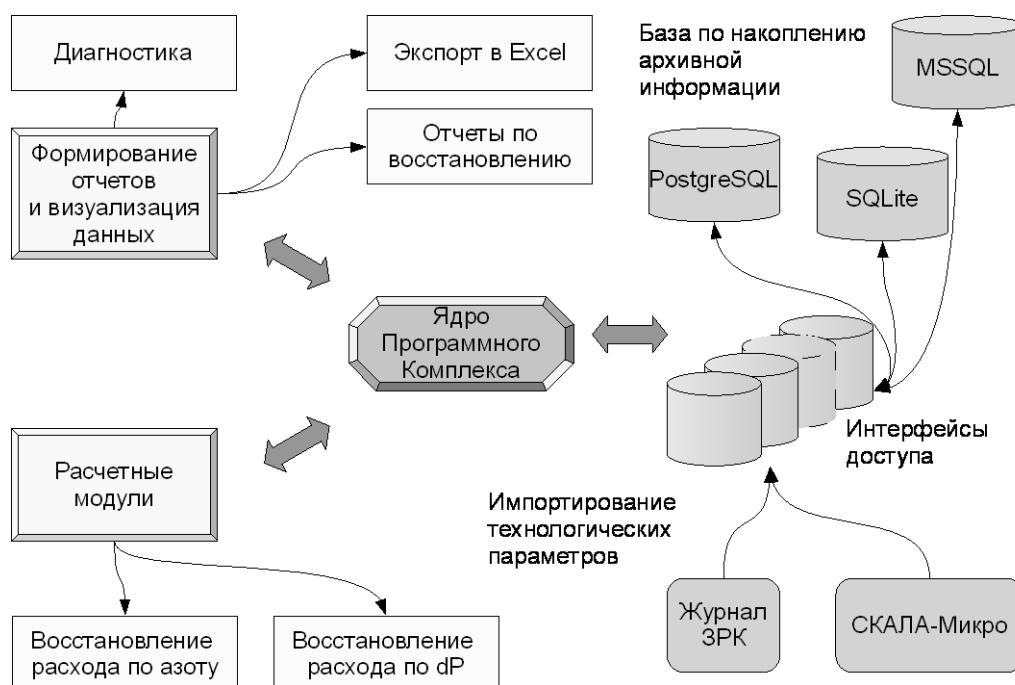


Рис. 5. Структура программного комплекса

Взаимодействие с данными происходит за счет дополнительного модуля, тем самым обеспечивается абстрагирование от конкретной СУБД. Это вынесено в интерфейс представления данных, на чем строится вся обработка данных внутри комплекса. Данное представление достаточно просто – хранилище представляет множество датированных записей – кортежей. Каждая запись может содержать множество именных блоков – элементов с данными (рис. 6), а каждый блок представляет конечное представление данных (картограммы, массивы, таблицы значений), и все расчетные части используют только запись (или записи) как входной параметр, извлекая необходимые блоки уже непосредственно в алгоритме.

| | | | | |
|----------------------|----------------|----------------|-------------------|-----------|
| sdate: 01.01.2009 | date: 03:14 | name: flow | help: Расход | Данные... |
| | date: 03:14 | name: power | help: Мощность | Данные... |
| stream: skala | date: 01:57 | name: zagr | help: Загрузка | Данные... |

Рис. 6. Представление кортежа данных.

Реализованы модули для работы с PostgreSQL, SQLite, MsSQL. Хранилища типа PostgreSQL и MsSQL хорошо подходят для промышленного использования с работой на выделенном сервере, и за счет поддержки транзактных моделей данных возможно подключение множества клиентов к одному хранилищу. SQLite, напротив, использует простое хранилище, которое как правило, находится на том же компьютере, что и весь программный комплекс, это может быть полезно для исследовательских целей.

Так как работа в комплексе идет на уровне модели базы данных, то для работы с внешними данными (технологическими параметрами) были созданы модули конвертации. Они служат для обработки данных с разных систем реактора. Это модуль по работе со СКАЛой-Микро, СКАЛой, системой АКГО, системой КЕНТАВР, файлами данных по ЗРК и прочими технологическими параметрами. Несомненно, каждая система использует свое представление, и чтобы не мешать с общей логикой программы, эти модули и были выделены в отдельные единицы. При этом расширение поддерживаемых форматов чтения данных достигается за счет написания дополнительного модуля, не затрагивая логику всего приложения, что может быть полезно на этапе эксплуатации, когда уже изменение всего комплекса нежелательно.

Модули отображения служат для представления абстрактной информации в графическом виде – это построение картограмм загрузки, картограмм технологических параметров, разностных картограмм значений, графиков и другой наглядной информации. На рис. 7 показано главное окно расчетного комплекса в режиме просмотра картограммы. Данная система поддерживает разные форматы экспортирования данных для последующей обработки или составления отчетов, тем самым упрощается анализ данных, а в самом простом случае в системе уже есть все необходимые средства для экспресс - анализа и формирования результата работы. В систему могут быть встроены дополнительные функции – плагины, они предназначены для конкретного математического расчета, тем самым обеспечивается независимость вычислительной части от вспомогательной части комплекса – работа по импорту данных, работа с базой данных (БД).

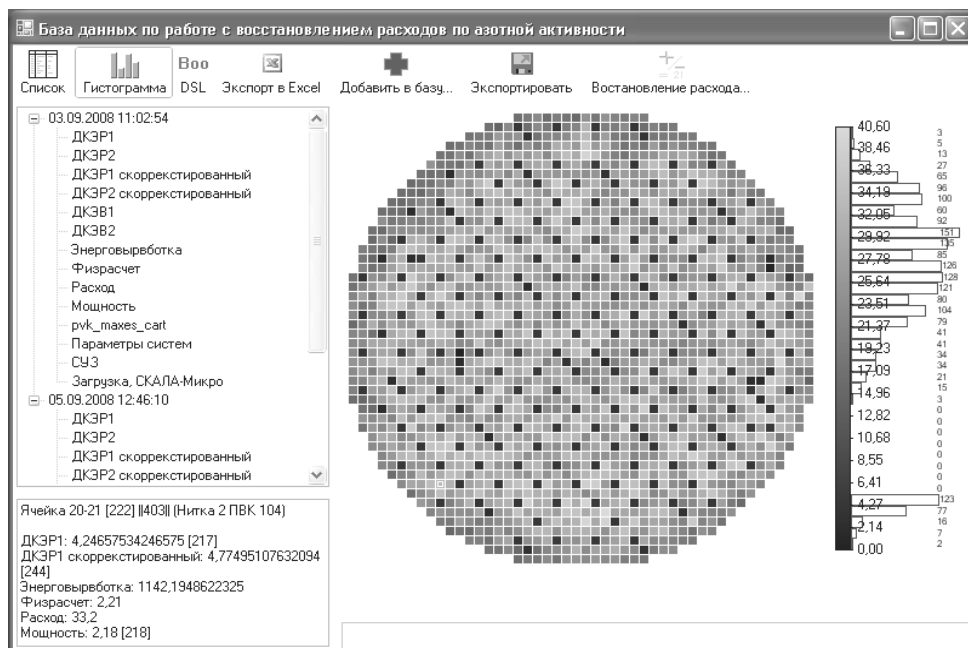


Рис. 7. Пример интерфейса программного комплекса.

Непосредственно для работы алгоритма восстановления расхода используются два плагина – по расчету расхода по азотной активности и по определению максимумов азотной активности. В плагине по расчету азотной активности используются механизмы параллелизации вычисления, происходит разбиение простых задач интегрирования дифференциальных уравнений на отдельные потоки (ядра процессора), тем самым практически обеспечивается линейная зависимость увеличения скорости расчета от числа физических ядер. На процессоре Intel Core Quad 2.93 ГГц процедура полного восстановления занимает примерно 3 с.

При восстановлении расхода в исполняемом модуле происходит извлечение адаптационных коэффициентов (а при необходимости и их расчет), извлечение мощностей, расходов, положений ЗРК. Для рассчитанных адаптационных коэффициентов организован кэш в базе, и так как они не меняются (пока не будет изменен алгоритм расчета), то это экономит время для восстановления. Рассчитанные расходы также можно хранить в базе.

В четвертой главе описан порядок проведения испытаний комплекса и результатов его опытной эксплуатации.

Испытания РИК-КРТ на первом энергоблоке Курской АЭС проводились в августе - сентябре 2008 г., а опытная эксплуатация – с мая по сентябрь 2009 г. Эти мероприятия преследовали следующие цели:

- уточнение метрологических характеристик исходных экспериментальных данных энергоблока № 1 (погрешность измерения активности теплоносителя в «азотном» диапазоне), необходимых для определения расхода теплоносителя через ТК с помощью РИК-КРТ;

- определение расхождения между показаниями «ШТОРМ-32М» и расходом, восстановленным в ТК с «запрещенным» расходомером с помощью РИК-КРТ при работе энергоблока на мощности;
- отработка методики по применению РИК-КРТ на энергоблоке №1 Курской АЭС;
- выработка рекомендаций по доработке математического и программного обеспечения РИК-КРТ;
- набор статистики измерений для проведения метрологической аттестации расчетно-измерительного комплекса.

До начала проведения испытаний и опытной эксплуатации расчетно-измерительного комплекса были выполнены следующие работы:

- проверено соответствие в базах данных длин пароводяных коммуникаций (ПВК) номера ячейки ТК и номера трубопровода в ряду ПВК, подключенных к барабанам-сепараторам энергоблока № 1 Курской АЭС;
- подготовлено программное обеспечение РИК-КРТ на базе архива АКГО и файлов состояния энергоблока за предшествующий период;
- произведена настройка расчетно-измерительного комплекса по результатам сканирования активной зоны с помощью аппаратуры контроля герметичности оболочек АКГО и значений поканальных мощностей и расходов;

Испытания и опытная эксплуатация РИК-КРТ проводились при работе реактора на стационарном уровне мощности.

Для определения погрешности измерения активности теплоносителя были проведены специальные эксперименты. При этом тележки КГО находились на «постоянном контроле» около выбранного ТК, технологические параметры которого практически оставались постоянными (мощность и расход по данным системы централизованного контроля изменялись в диапазоне 0,5% и 1% соответственно).

Непрерывные измерения активности теплоносителя в течение заданного времени (20 мин) выявили, что относительное среднее квадратическое отклонение измеренного значения от среднего значения зависит от времени экспозиции (выборки) детектором активности теплоносителя данного ТК и составляет:

- для времени выборки 1 с – 3,0%
- для времени выборки 5 с – 1,1%
- для времени выборки 10 с – 0,8%

Из представленных результатов видно, что увеличение времени экспозиции снижает случайную ошибку измерения примерно в 3 раза.

В табл. 1 приводятся некоторые результаты опытной эксплуатации РИК-КРТ. При восстановлении расхода по информации об азотной активности на одном из временных срезов модель настраивалась (адаптировалась), а на момент другого временного среза проводилось восстановление расхода и сравнение его величины со значе-

нием, полученным по штатному расходомеру. При этом значение расхода в каждом из 1661-одном топливном канале фиктивно запрещалось (считалось неизвестным).

Таблица 1

Результаты восстановления расхода теплоносителя по информации об азотной активности

| Дата настройки | Дата Восстановления | Среднее по реактору относительное рассогласование со «Штурмом»,% |
|---------------------|---------------------|--|
| 06.06.2009 9:52:46 | 07.06.2009 13:52:58 | 9,22 |
| 07.06.2009 13:52:58 | 08.06.2009 8:35:06 | 8,72 |
| 08.06.2009 8:35:06 | 09.06.2009 9:35:18 | 8,67 |
| 09.06.2009 9:35:18 | 10.06.2009 11:43:30 | 8,91 |
| 10.06.2009 11:43:30 | 11.06.2009 11:19:56 | 8,94 |
| 11.06.2009 11:19:56 | 12.06.2009 10:58:06 | 9,44 |
| 12.06.2009 10:58:06 | 15.06.2009 10:40:38 | 9,62 |
| 15.06.2009 10:40:38 | 24.06.2009 9:27:14 | 9,61 |
| 24.06.2009 9:27:14 | 25.06.2009 10:15:24 | 9,44 |
| 25.06.2009 10:15:24 | 26.06.2009 10:01:36 | 9,17 |
| 26.06.2009 10:01:36 | 29.06.2009 12:14:08 | 8,97 |
| 29.06.2009 12:14:08 | 30.06.2009 12:10:20 | 8,89 |
| 30.06.2009 12:10:20 | 01.07.2009 9:56:28 | 8,76 |
| 01.07.2009 9:56:28 | 02.07.2009 7:28:38 | 9,29 |
| 02.07.2009 7:28:38 | 07.07.2009 13:17:36 | 10,89 |
| 07.07.2009 13:17:36 | 09.07.2009 13:23:56 | 8,65 |
| 09.07.2009 13:23:56 | 10.07.2009 10:42:04 | 8,45 |
| 10.07.2009 10:42:04 | 11.07.2009 11:16:16 | 9,07 |
| 11.07.2009 11:16:16 | 11.07.2009 12:38:16 | 8,43 |
| 11.07.2009 12:38:16 | 13.07.2009 9:46:36 | 10,09 |
| 13.07.2009 9:46:36 | 14.07.2009 9:24:50 | 9,71 |
| 14.07.2009 9:24:50 | 15.07.2009 9:28:58 | 8,63 |

На рис. 8 показана гистограмма распределения рассогласования расхождения расходов, определенных по штатной методике и с помощью РИК-КРТ. В среднем рассогласование восстановленного расхода со штатным составляет порядка 10 %. Большие расхождения вызваны либо перегрузками в интервале между моментами

адаптации модели и восстановлением расхода, либо в ТК с низким объемным паросодержанием.

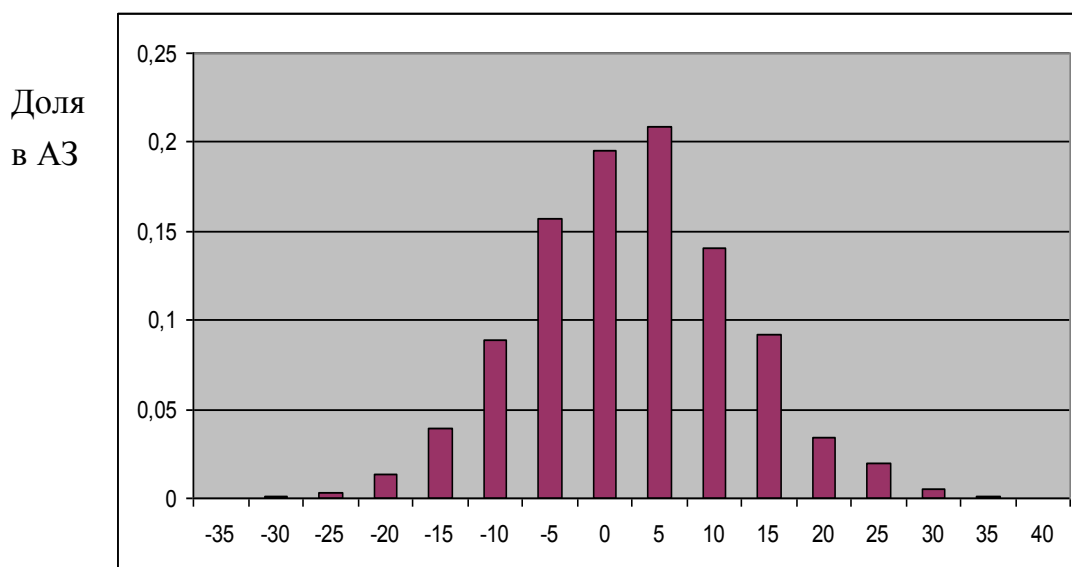


Рис. 8. Гистограмма распределения относительного рассогласования в определении расхода теплоносителя штатным расходомером и РИК-КРТ.

Особый интерес представляет случай, когда «по азоту» определялся расход теплоносителя в ТК, где в процессе эксперимента менялась степень открытия ЗРК. За период опытной эксплуатации РИК-КРТ положение лимба ЗРК изменялось в 545 технологических каналах. Причем, в тех ТК, где не было перегрузок, рассогласование значений расходов по «АЗОТу» и «ШТОРМу» составляет в среднем 2%. Перегрузки приводят к необходимости заново адаптировать математическую модель.

Анализ показал, что чем меньше паросодержание в ТК, тем хуже восстанавливается расход.

Из показанного на рис. 9 относительного рассогласования в зависимости от отношения мощности ТК к расходу $\frac{W}{G}$ видно, что при $\frac{W}{G} > 0,04 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^3/\text{час}}$, (что соответствует объемному паросодержанию более 50%) относительное рассогласование порядка 10%.

Из рис. 10 видно, что число ТК с отношением $\frac{W}{G} > 0,04 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^3/\text{час}}$ составляет подавляющее большинство.

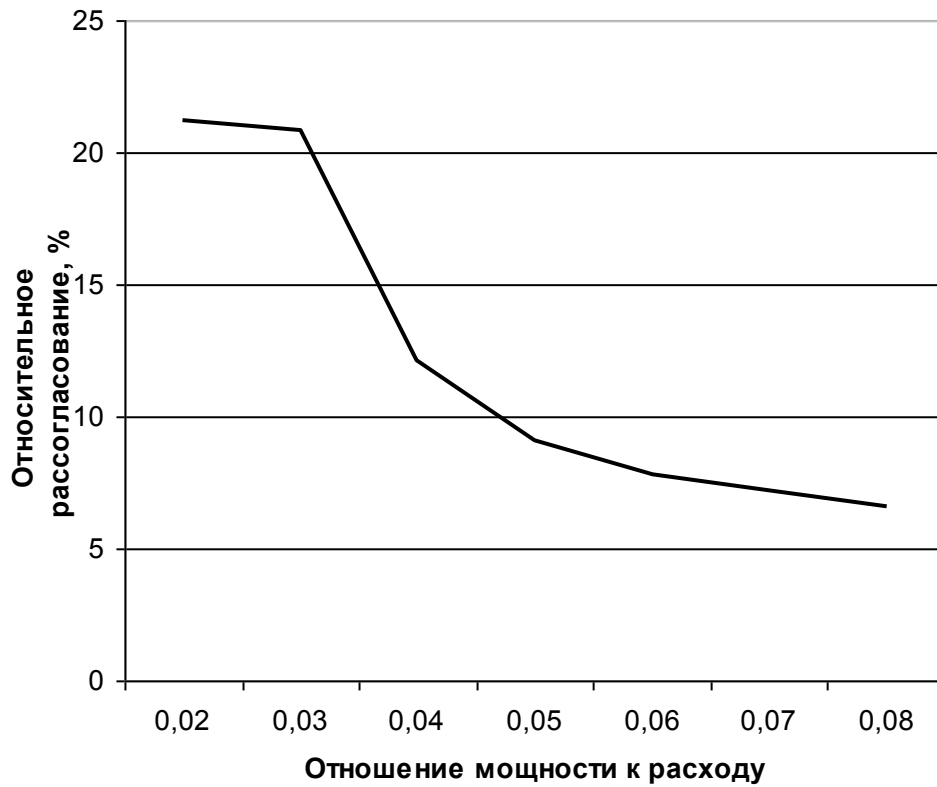


Рис. 9. Зависимость относительного рассогласования показаний расходомера «ШТОРМ -М» и расхода, определенного по РИК-КРТ.

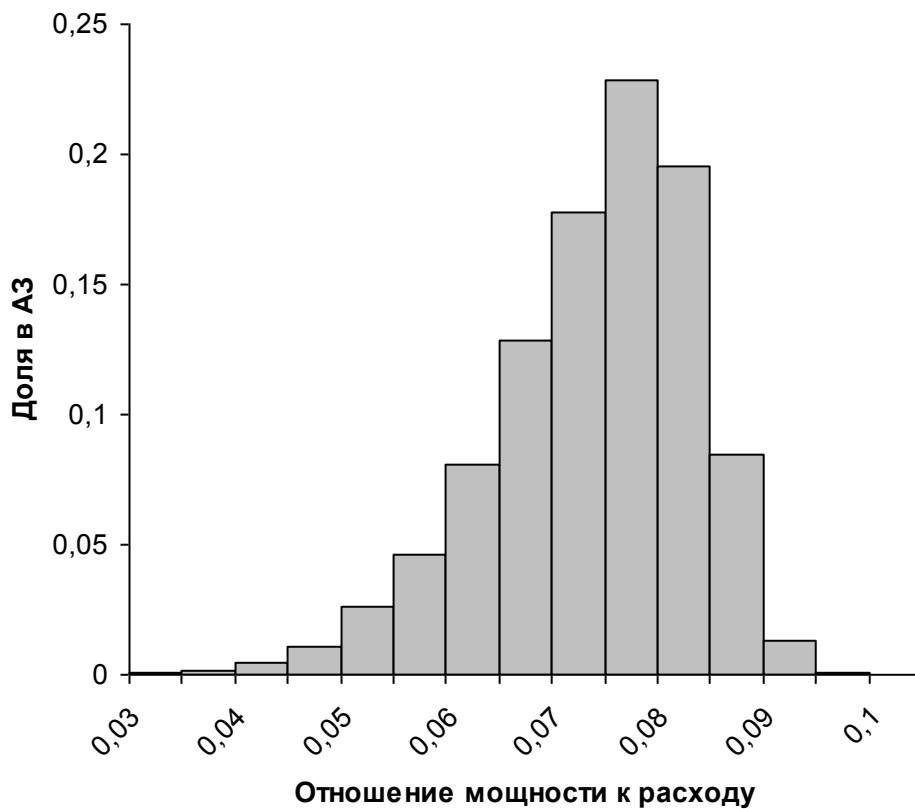


Рис.10. Распределение ТК по отношению мощности к расходу.

Таким образом, результаты опытной эксплуатации расчетно-измерительного комплекса показали, что при работе реактора на номинальной мощности рассогласование результатов восстановления расхода с помощью РИК-КРТ и ШТОРМ 32М составляет в среднем 10%.

Накопленная экспериментальная информация в процессе испытаний и опытной эксплуатации РИК-КРТ позволила ОАО «НИКИЭТ» провести метрологический анализ и аттестацию метода выполнения измерений. Согласно свидетельству об аттестации методика может быть использована как дополняющая по отношению к штатной при работе реактора на энергетическом уровне мощности с «приписанным значением погрешности» 15% в диапазоне отношений мощности ТК к расходу теплоносителя не менее $0,04 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^3/\text{час}}$.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработаны математическая модель активации теплоносителя в технологическом канале реактора РБМК и алгоритмы обработки сигналов КГО с целью выделения экспериментальной информации о наведенной активности теплоносителя.
2. Предложена методика определения расхода теплоносителя в канале с запрещенным расходомером при работе реактора на энергетическом уровне мощности.
3. Разработан алгоритм настройки математической модели на конкретный топливный канал. Предложен алгоритм фильтрации исходной экспериментальной информации об азотной активности.
4. Предложен улучшенный алгоритм восстановления расхода теплоносителя в канале с запрещенным расходомером как по данным об азотной активности, так и по информации о перепаде давления между напорным коллектором и барабаном-сепаратором.
5. Впервые разработан расчетно-измерительный комплекс контроля расхода воды в топливном канале реактора РБМК на основе информации об активности теплоносителя. Программный комплекс адаптирован по информационным каналам к энергоблокам Курской АЭС и позволяет определять расход теплоносителя в случае отказа штатного расходомера.
6. При испытаниях и опытной эксплуатации программного комплекса на действующем энергоблоке Курской АЭС, установлено, что рассогласование между показаниями штатного расходомера и расходом, определенным с помощью РИК-КРТ, зависит от отношения мощности данного канала к расходу теплоносителя и для каналов с объемным паросодержанием более 50% рассогласование не превышает 10%.
7. Метод выполнения измерения расхода с помощью РИК-КРТ прошел метрологическую аттестацию, согласно которой методика может быть использована как дополняющая по отношению к штатной при работе реактора на энергетическом уровне мощности с «приписанным значением погрешности» 15% в диапазоне отношений мощности ТК к расходу теплоносителя не менее

$$0,04 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^3/\text{час}}.$$

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Загребаев А.М., Костанбаев С.В., Овсянникова Н.В., Егоров М.И., Полянских С.А., Речкиман А.Э., Жуков И.В., Потапов А.А. Контроль расхода теплоносителя в топливном канале РБМК на основе информации об активности. // Атомная энергия. Т.108. Вып. 2. С. 82-85.
2. Загребаев А.М, Костанбаев С.В., Овсянникова Н.В. Расчетно-измерительный комплекс контроля расхода в канале реактора РБМК на основе информации об активности теплоносителя. // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2010. №1. С. 138-145.
3. Загребаев А.М, Костанбаев С.В., Овсянникова Н.В. Автоматизированная система контроля степени открытия запорно-регулирующих клапанов в реакторе РБМК. // Автоматизация в промышленности. 2010. № 2. С. 29-31.
4. Загребаев А.М, Костанбаев С.В., Овсянникова Н.В. Автоматизированная система контроля расхода теплоносителя в канале реактора РБМК по информации о перепаде давления. // Естественные и технические науки. 2009. №6(44). С. 540-541.
5. Загребаев А.М, Костанбаев С.В. Разработка математического обеспечения для текущего контроля расхода теплоносителя по данным о его активности. // В сб.: Труды XVI международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации». Сентябрь 2007 г. Алушта. С. 54-55.
6. Загребаев А.М, Костанбаев С.В. Использование средств графического процессора при решении задачи восстановления расхода теплоносителя по информации об азотной активности // В сб.: Труды XVII международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации». Сентябрь 2008 г. Санкт-Петербург. С. 48-49.
7. Загребаев А.М, Костанбаев С.В. Разработка и внедрение расчетно-измерительного комплекса контроля расхода теплоносителя на основе обработки сигналов КГО. // В сб.: Материалы XV семинара по проблемам физики реакторов «Актуальные проблемы физики ядерных реакторов – эффективность, безопасность, нераспространение». Москва. 2008г. М.: МИФИ, 2008. С. 178-180.
8. Загребаев А.М, Костанбаев С.В. Расчетно-измерительный комплекс контроля теплоносителя реактора РБМК на основе информации об активности теплоносителя // НИЯУ МИФИ 2010. Аннотации докладов. Т. 1. Ядерная физика и энергетика. М. НИЯУ МИФИ, 2010. С. 42.