

# РАСЧЕТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ РАСХОДА В КАНАЛЕ РЕАКТОРА РБМК НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИИ ОБ АКТИВНОСТИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

**А.М. Загребаев, С.В. Костанбаев, Н.В. Овсянникова**

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва*



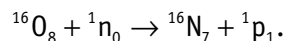
В статье рассматривается методика определения расхода теплоносителя в топливном канале реактора РБМК на основании информации об «азотной» активности теплоносителя. Описывается математическая модель активации теплоносителя в канале РБМК и алгоритм определения расхода в ТК с «запрещенным расходомером». Приводятся результаты опытной эксплуатации расчетно-измерительного комплекса по контролю расхода теплоносителя на первом блоке Курской АЭС (область применимости и погрешность определения расхода данным методом).

Описывается структура, принцип функционирования и результаты опытной эксплуатации расчетно-измерительного комплекса по определению расхода теплоносителя на основе информации об активности.

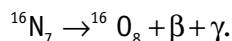
**Ключевые слова:** контроль, расход теплоносителя, топливный канал, реактор РБМК, активность теплоносителя.

**Key words:** control, flow rate, fuel channel, RBMK-type reactor, coolant activity.

В практике эксплуатации реакторов РБМК нередки ситуации, когда некоторым показаниям расходомеров верить нельзя, т.е. появляются «запрещенные» расходомеры. Это обстоятельство накладывает дополнительные ограничения на режим эксплуатации реактора, например, при проведении перегрузок топлива или подъема мощности после кратковременных остановок. По этой причине актуальным представляется определение значения расхода в данном канале независимым от штатного способом. Такой способ существует благодаря тому обстоятельству, что водный теплоноситель в активной зоне активизируется быстрыми нейтронами.



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



Наведенная активность зависит от мощности, расхода теплоносителя и времени доставки к точке измерения активности. Для измерения активности теплоносителя может быть использована система контроля герметичности оболочки твэлов (СКГО), которая в энергетическом диапазоне – более 3,5 МэВ фиксирует и наведенную активность теплоносителя.

© **А.М. Загребаев, С.В. Костанбаев, Н.В. Овсянникова, 2010**

В работе [1] были предложены математическая модель активации теплоносителя и алгоритм ее использования для определения расхода теплоносителя. 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 [2]. Это обстоятельство в существенной степени влияет на практическую возможность определения расхода по измеренной «азотной» активности, поскольку позволяет использовать современную вычислительную технику, а следовательно, и мощные математические модели и алгоритмы. В данной работе приводятся результаты опытной эксплуатации расчетно-измерительного комплекса контроля расхода теплоносителя (РИК-КРТ) на первом энергоблоке Курской АЭС, осуществляющего сбор необходимой технологической информации, ее хранение и обработку. Комплекс привязан к базе данных АКГО и файлам состояния системы «СКАЛА-МИКРО».

Математическая модель активации теплоносителя в канале реактора РБМК, используемая в РИК-КРТ, представляет собой систему дифференциальных уравнений.

#### Активная зона

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

#### ПВК

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

Условие 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  $N'(L)$ .

В формулах приняты следующие обозначения:

$A$  – переводной коэффициент,  $1/(\text{Дж} \cdot \text{кг})$ ;

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

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

$z$  – координата по высоте АЗ и ПВК, м;

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

$W$  – 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;

$\alpha$  – доля быстрых нейтронов из соседних каналов окружения.

Функции  $\omega(z)$ ,  $\rho(z)$  определяются в результате теплогидравлического расчета.

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

Во время 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» –  $G_{\text{ш}}(t)$ . Находится отношение

$$\xi(t) = \frac{N_3(t)}{N'(W(t), G_{\text{ш}}(t), L)}.$$

Считается, что этот индивидуальный для каждого ТК

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

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

Таким образом, если в интервале времени  $\Delta t$  после настройки модели отказал расходомер, то значение расхода теплоносителя может быть определено при известной мощности ТК и измеренному значению активности теплоносителя. Настройка модели производится при каждом сканировании активной зоны системой КГО.

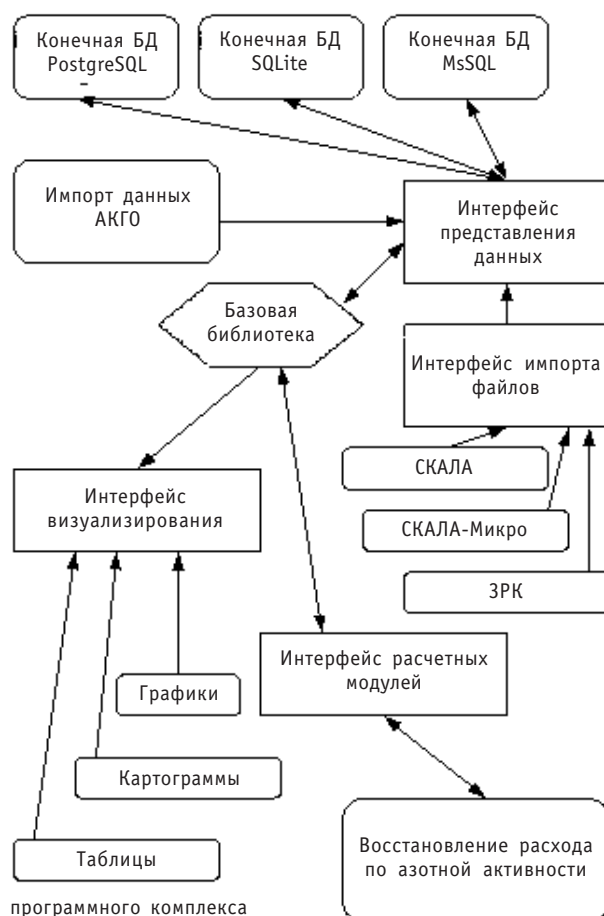


Рис. 1. Структура программного комплекса

Разработанный расчетно-экспериментальный комплекс имеет универсальную структуру (рис. 1). Состоит из базовой библиотеки работы с данными, дополнительными модулями конвертации и модулей отображения. Библиотека работы с данными предназначена для абстрактной работы с данными и взаимодействия с конечной СУБД. Сюда 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.

Конечное взаимодействие 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. Каждая запись может содержать множество именных блоков, а каждый блок – конечное представление данных (картограммы, массивы, таблицы значений). Все расчетные части используют только запись (или записи) как входной параметр, извлекая необходимые блоки уже непосредственно в алгоритме. На текущий момент написаны 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.

Поскольку работа в комплексе идет на уровне модели базы данных, то для работы с внешними данными (технологическими параметрами) были созданы модули конвертации, служащие для обработки данных с разных систем реактора: модуль по работе со СКАЛА-Микро, СКАЛА, системами АКГО и КЕНТАВР, файлами данных по ЗРК и прочими технологическими параметрами. Несомненно, каждая система использует свое представление, и чтобы не смешивать с общей логикой, 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 очень полезно на этапе эксплуатации, когда уже изменение всего комплекса очень нежелательно.

Модули отображения служат для представления абстрактной информации в удобочитаемый вид, чтобы можно было визуально просматривать данные (построение картограмм загрузки, картограмм технологических параметров, разностных картограмм значений, графиков и другой наглядной информации). 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, предназначенные для конкретного математического расчета, тем самым обеспечивается независимость вычислительной части от вспомогательной части комплекса (работа по импорту данных, работа с БД).

Непосредственно для работы алгоритма восстановления расхода используются плагин по расчету расхода по азотной активности и плагин по определению максимумов азотной активности. Первый реализует математическое обеспечение, описанное выше; второй работает по автокорреляционному методу, тем самым находя основной период чередования максимумов. Для определения точного положения первого максимума используется поиск по росту относительной дисперсии, после чего алгоритм помечает зоны поиска последующих, используя полу-

ченную информацию об основном периоде. Однако азотные прописки могут быть и сбойными (прервана запись, слишком низкий уровень сигнала, не отличимый от шума). Для предотвращения этого используется проверка по количеству найденных пиков и сравнивается относительный уровень пика с картограммой загрузки нитки. В итоге каждому несоответствию приписывается определенный уровень штрафа, и по превышению некоторого данного значения модуль выводит сообщение об ошибке (рис. 2).

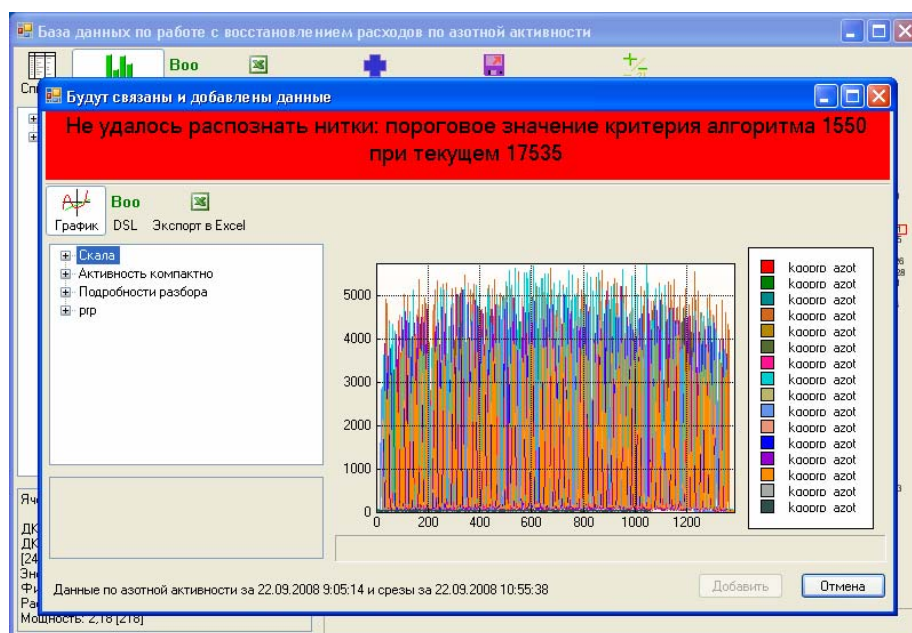


Рис. 2. Пример интерфейса при разборе «сбойной» прописки

Кроме того 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 три секунды.

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 т.к. они не меняются (пока не будет изменен алгоритм расчета), то это экономит время для восстановления. Рассчитанные расходы также можно хранить в базе.

В процедурах, в первую очередь, происходит вычисление мощности окружения по картограмме мощности. Далее производится преобразование картограмм в данные, сформированные по ниткам, и потом производятся сами расчеты (восстановление расходов, определение адаптационных коэффициентов). После расчетов происходит объединение полученной информации в единую картограмму (рис. 3).

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:

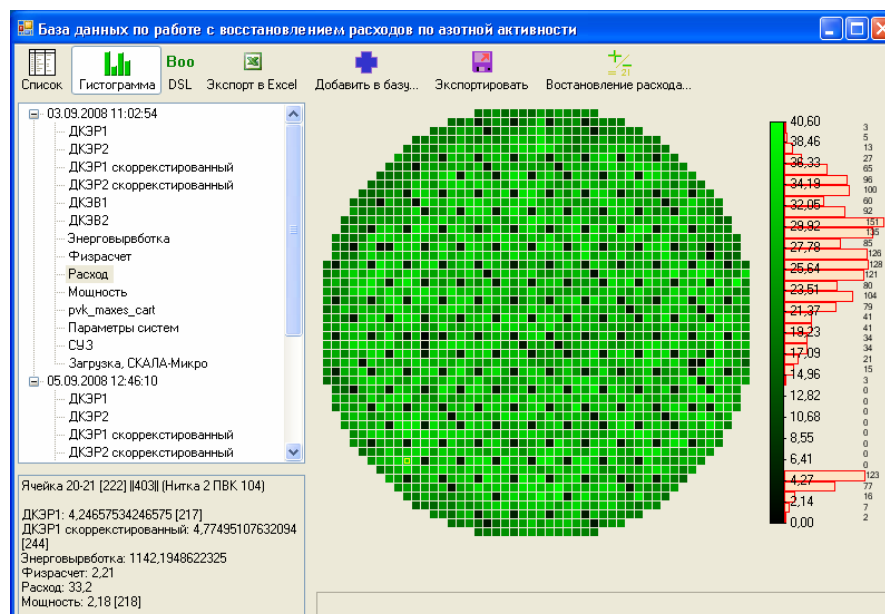


Рис. 3. Пример интерфейса программного комплекса

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

Для оценки погрешности измерения активности теплоносителя были проведены специальные эксперименты, когда тележки КГО находились на постоянном контроле около выбранного ТК в течение 20 мин. Оценки показывают, что относительная погрешность измерения азотной активности  $\approx 5\%$ .

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 значением, полученным по штатному расходомеру. При этом значение расхода в каждом топливном канале фиктивно запрещалось (считалось неизвестным). Анализ результатов опытной эксплуатации показал следующее.

1. Рассогласование между показаниями штатного расходомера и расходом, определенным с помощью РИК-КРТ, зависит от отношения мощности данного канала к расходу теплоносителя через него (рис. 4). Из рисунка видно, что рассогласование уменьшается с ростом отношения  $\frac{W}{G}$ , т.е. чем больше паросодержание

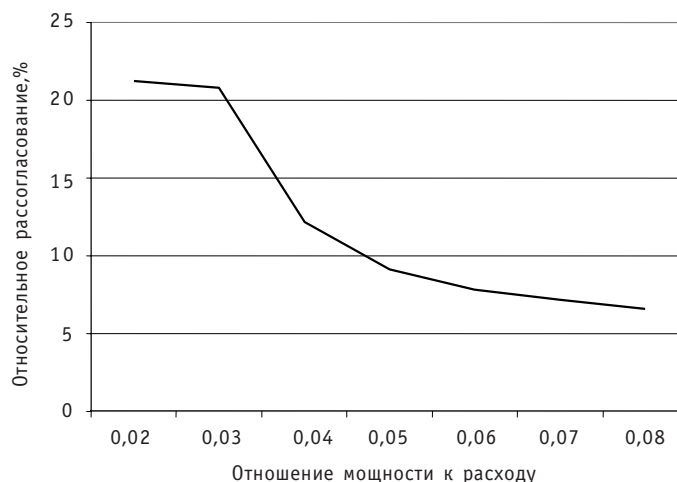


Рис. 4. Зависимость относительного рассогласования показаний ШТОРМ-32М и РИК-КРТ от технологических параметров канала

в канале, тем меньше расхождение. Например, при  $\frac{W}{G} > 0,04$  (объемное паросодержание более 50%) рассогласование не превышает 10%. Таких топливных каналов в активной зоне подавляющее большинство, о чем свидетельствует гистограмма распределения ТК по отношению  $\frac{W}{G}$  (рис. 5).

2. Рассогласование не превышает 10% и в том случае, если в интервале времени между настройкой и восстановлением менялся расход теплоносителя.

3. В каналах, где произошла перегрузка ТК, математическую модель следует настраивать заново.

В настоящий момент методика применения РИК-КРТ такова: три раза в неделю производится сканирование активной зоны, и информация об «азотной» активности теплоносителя через внешний носитель передается в локальную сеть. При этом на начало и окончание сканирования из локальной сети извлекаются данные о мощности и расходе теплоносителя. Эти данные обрабатываются комплексом

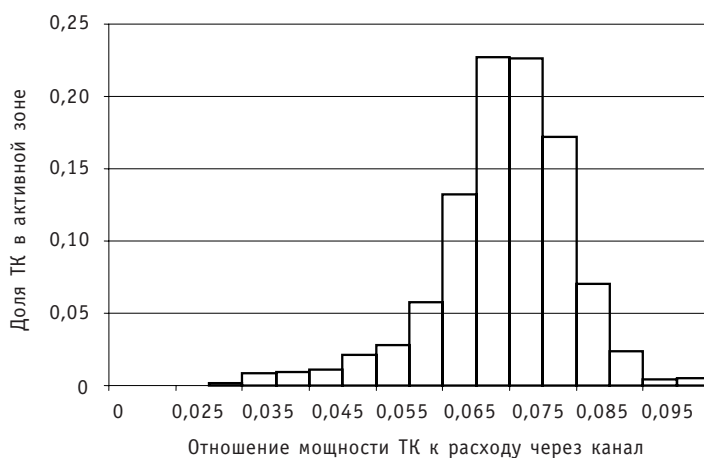


Рис. 5. Гистограмма распределения числа топливных каналов по отношению мощности к расходу теплоносителя



РИК-КРТ. Понятно, что желательно полностью автоматизировать процесс получения исходной информации (завести сигналы КГО в локальную сеть).

В результате опытной эксплуатации был накоплен экспериментальный материал (более 30 временных срезов) который позволил провести метрологическую аттестацию методики выполнения измерений. Согласно свидетельству об аттестации МВИ, выданному ОАО НИКИЭТ им. Доллежаль, значение относительной погрешности определения расхода в ТК не превышает 15% при работе реактора на энергетическом уровне мощности в диапазоне отношений мощности ТК к расходу не менее 0,04 МВт/(м<sup>3</sup>/ч).

### **Литература**

1. Доллежаль Н.А., Емельянов И.Я. Канальный ядерный энергетический реактор. – М.: Атомиздат, 1980.
2. Алексаков Г.Н., Кудрявцев А.В., С.М., Лапииков Ю.А., Федоров В.А., Николаев Б.П., Чижевский Ю.Б. Опыт эксплуатации системы автоматизации измерений «Кентавр-6К» на энергоблоках Курской АЭС. – Проблемы безопасности ядерно-энергетических установок/Тез. докл. IX Семинара по проблемам физики реакторов (Москва, 4-8 сентября 1995 г.). – Т. 1. – М.: МИФИ, 1995. – С. 96-97.
3. Лысиков Б.В., Прозоров В.К. Термометрия и расходомерия ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

Поступила в редакцию 13.11.2009



There are represented the results of calculation and experimental research of hydrodynamics in a contour of repeated compulsory circulation RBMK and behaviour of impurity during a stop of the block (decrease in power). Recommendations for an effective using of the given processes to decrease a concentration of impurity in volume of contour of repeated compulsory circulation, to lower a dose of radiation during repair work is developed.

#### УДК 621.039.534

*Control of Flow Rate in Fuel Channel RBMK-type Reactor from Information about Coolant Activity* \ A.M. Zagrebayev, S.V. Kostanbayev, N.V. Ovsyannikova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 8 pages, 5 illustrations. – References, 3 titles.

The paper presents the computational and measuring system for control of coolant flow rate in technological channels of RBMK-type reactors from experimental data about intensity of gamma-radiation emitted by  $^{16}\text{N}$  isotope in light-water coolant. Also, the paper presents the following aspects of computational and measuring system: mathematical model of coolant activation process, numerical algorithm for determination of coolant flow rate in technological channels, structure and operation of the computational and measuring system, the results obtained in trial operation of the computational and measuring system at Kursk NPP Unit 1, applicability area and typical errors in determination of coolant flow rate.

#### УДК 621.039.548

*Measurement of Thermal Properties of the Fuel Rods Power Nuclear Reactors by Method of Pulse Heating* \ V.B. Kruglov, A.B. Kruglov, I.G. Pozdeeva, V.S. Kharitonov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 6 illustrations. – References, 8 titles.

In the work the method of definition of thermophysical properties of the fuel elements of power nuclear reactors such as heat conductivity, a thermal capacity of fuel and heat transfer factor between fuel and rod cover is offered. Results of check of a method of definition of a thermophysical capacity of the fuel rod elements reactor VVER are shown.

#### УДК 621.039.52:615.849.1

*The MARS and TAPIRO Small Capacity Reactors for BNCT Applications* \ Yu.A. Kurachenko, D.N. Moiseenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 11 pages, 4 tables, 5 illustrations. – References, 25 titles.

The advantages and disadvantages of two small capacity reactors: TAPIRO (Italy, existing now) and MARS (Russia, projectible) are analyzed for boron neutron capture therapy (BNCT) applications. Comparison of the installations is done for a set of characteristics, namely, core composition, maximal & average flux in a core, leakage spectrum etc. Special attention is focused on a comparison of the installations with respect to radiation and nuclear safety. The advantages of the MARS reactor are apparent here. The next batch of comparing characteristics was the beam quality rating relative to BNCT (accordingly to «in air» and «in phantom» criteria). Besides, patient protection at therapy session was analyzed by computation. A conclusion is drawn that relative to radiation & nuclear safety, overall dimensions & total mass and manufacturability as well, the projectible MARS reactor exceeds the existing TAPIRO one. As for BNCT applications, the MARS reactor is highly competitive with the TAPIRO. The sole (but indisputable) advantage of the TAPIRO facility is its real existence.

#### УДК 621.039.51

*Updating of Procedure of Calculation of the Reactor-Converter Multicell Thermionic Fuel Element output Characteristics* \ M.A. Polous; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 1 table, 8 illustrations. – References, 11 titles.