

# РАСЧЕТ МОЩНОСТИ РУ ПО ПАРАМЕТРАМ ВНУТРИРЕАКТОРНЫХ ДЕТЕКТОРОВ. АНАЛИЗ ОПЫТА ЭКСПЛУАТАЦИИ

Д.В. Воробьева, Н.В. Липин, В.А. Мильто, Н.В. Мильто, Т.С. Сахарова, Д.Н. Скороходов  
НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

## Введение

Расчет мощности РУ по параметрам внутриреакторных детекторов (Ndpz) выполняется на основании показаний внутриреакторных детекторов (ДПЗ) с учетом восстановленного поля энерговыделения во всем объеме активной зоны.

Способ расчета Ndpz является практически безынерционным и независимым от тепловых методов.

Многолетние сопоставления мощности Ndpz с мощностями, определёнными другими способами (мощность по параметрам теплоносителя первого контура, мощность по параметрам теплоносителя в парогенераторе, мощность по параметрам теплоносителя в ПВД) и со средневзвешенной мощностью, выявили несколько основных проблем в расчете Ndpz:

- абсолютное отклонение Ndpz от средневзвешенной мощности;
- изменение величины отклонения Ndpz от средневзвешенной мощности в процессе топливной кампании (тренд);
- зависимость величины отклонения Ndpz от средневзвешенной мощности, от года эксплуатации и отсутствие использования индивидуальных характеристик СВРД.

Проведено расчетное тестирование на основе показаний внутриреакторных детекторов, охватывающее опыт эксплуатации СВРК на АЭС «Козлодуй» за последние 11 лет и на АЭС «Тяньвань» за последние 8 лет. Расчетное тестирование подтвердило устойчивую систематику увеличения отклонения мощности РУ, определенной по показаниям ДПЗ, от средневзвешенной в процессе эксплуатации топливной загрузки.

Выполненное тестирование позволило сопоставить влияние различных факторов на точность расчета Ndpz с учетом предыстории работы реактора за несколько топливных кампаний для разных энергоблоков, проанализировать влияние года эксплуатации и использования индивидуальных характеристик СВРД на примере эксплуатации нескольких партий СВРД на разных энергоблоках.

## 1 Исходные данные

Исследование проводилось по архивным данным:

- АЭС «Козлодуй» блок № 5 с 13 по 22 кампанию включительно;
- АЭС «Козлодуй» блок № 6 с 12 по 20 кампанию включительно и частично 21 кампания;
- АЭС «Тяньвань» блок № 1 с 2 по 8 кампанию включительно;
- АЭС «Тяньвань» блок № 2 с 1 по 8 кампанию включительно;

Для проведения расчетов создан программный комплекс, состоящий из следующих основных блоков:

- программа БИПР-7А;
- программа ПЕРМАК-А;
- программа подготовки последовательности данных из архива;
- прототип программного комплекса «Хортица-М»;
- мелкосеточная программа mf с двумя режимами работы: mf\_H2O – штатный вариант, и mf\_DPZ – усовершенствованный вариант, учитывающий наличие СВРД в трубке для детекторов.

Для проведения расчетов применялись:

- уточненные геометрические размеры эмиттеров ДПЗ, смещение ДПЗ по высоте активной зоны на основе паспортных данных, полученных от поставщика СВРД и от специалистов АЭС;
- использовались коэффициенты чувствительности ДПЗ, подготовленные для различных диаметров эмиттера, полученных от поставщика СВРД;
- усовершенствованные функции учета выгорания ДПЗ;

В выбранных тестах для АЭС «Тяньвань» было четыре кампании, когда подавляющее большинство СВРД было заменено на новые (1 и 5 кампании обоих блоков). Для АЭС «Козлодуй» было шесть кампаний, когда все СВРД были заменены на новые (13, 17, 21 кампании блока № 5, 13, 17, 21 кампании блока № 6)

## 2 Алгоритм расчета $N_{dpz}$ в СВРК

Мощность по ДПЗ в СВРК определяется по следующему соотношению:

$$N_{dpz} = \sum_{m=1}^{KNI} \sum_{k=1}^{NED} QED_{k,m} \cdot \frac{K_{dpz} \cdot L_{TBC}}{N_{goodIdpz}},$$

$$QED_{k,m} = Idpz_{k,m} \cdot SED_{k,m},$$

где  $QED_{k,m}$  – линейные энерговыделения в местах расположения ДПЗ;

$N_{dpz_{k,m}}$  – мощность реактора по показаниям ДПЗ;

$Idpz_{k,m}$  – нормализованный ток к ДПЗ в  $m$  КНИ;

$SED_{k,m}$  – коэффициенты чувствительности для  $k$  ДПЗ в  $m$  КНИ;

$N_{goodIdpz}$  – число (счетчик) достоверных показаний ДПЗ;

КНИ – число КНИ в активной зоне, КНИ = 64 (54);

NED – число ДПЗ в КНИ, NED = 7;

$m$  – номер КНИ в активной зоне,  $m = 1 \div KNI$ ;

$k$  – номер ДПЗ в одном КНИ,  $k = 1 \div NED$ ;

$L_{TBC} = N_{TVS} \cdot V_{ZON}$  – суммарная длина топливных частей всех ТВС;

$V_{ZON}$  – высота активной зоны,  $V_{ZON} = 355,0$  см (370);

$N_{TVS}$  – число ТВС в активной зоне,  $N_{TVS} = 163$ ;

$K_{dpz}$  – коэффициент, рассчитанный по восстановленному полю энерговыделения, и равный отношению мощности во всей активной зоне к мощности в местах размещения ДПЗ

Расчет коэффициента  $K_{dpz}$ , используемого при расчете мощности реактора по показаниям ДПЗ, проводится по формуле

$$K_{dpz} = \frac{QV_{cp}}{hpri} \cdot \frac{\sum_{k=1}^{KNI} \sum_{m=1}^{NED} (dodpz_{m,k} \cdot LDPZ_k)}{\sum_{k=1}^{KNI} \sum_{m=1}^{NED} (QVd_{m,k} \cdot dodpz_{m,k})},$$

$QV_{cp}$  – среднее энерговыделение в объеме активной зоны;

$hpri$  – высота призмы,  $hpri = \frac{V_{ZON}}{NPRI}$ ;

$NPRI$  – число призм в ТВС,  $NPRI = 16$ ;

$LDPZ$  – длина эмиттера ДПЗ;

$QVd_{m,k} = \sum_{i=1}^{NPRI} (QV_{i,j} \cdot dnom_{k,m,i})$ ;

$QV_{i,j}$  – восстановленное поле энерговыделения в  $i$  призме  $j$  ТВС;

$dnom_{k,m,i}$  – матрица связи поля энерговыделения с интегралами энерговыделений в местах расположения ДПЗ. Трехмерная матрица связи ( $7 \times 64$  или  $(54) \times 16$ ) заполняется с учетом смещений ДПЗ по вертикали при старте системы и используется для перевода

рассчитанных нейтронно–физических величин из шестнадцати в семь точек по высоте активной зоны с переходом от 163 ТВС к 64 (или 54) ТВС с КНИ.

### **3 Факторы, влияющие на погрешность $N_{dpz}$ , вариации которых использовались в расчетах**

Перед началом расчетов были выделены следующие возможные факторы, влияющие на погрешность определения мощности по параметрам внутриреакторных детекторов:

#### **3.1 Неопределенность расчетов модуля $mf$ для описания ячеек с СВРД**

В штатном варианте  $mf$  и в проектной программе ПЕРМАК-А для всех ТВС принимается, что в расчетной ячейке, предназначенной для расположения СВРД, нет СВРД (ячейка заполнена водой). Учет наличия СВРД в трубке для детекторов реализуется при подготовке коэффициентов чувствительности для ДПЗ в программе ТВС-М. Соответственно, если при реальной эксплуатации в ячейке находится СВРД (вода вытеснена СВРД), то расчетное энерговыделение окружающих твэлов и  $K_c$  завышается, что приводит к завышению шлаков твэлов, окружающих трубку с СВРД (SLC) в текущей кампании. В следующую кампанию, если в эту ТВС устанавливается СВРД, возникает дополнительная погрешность в определении энерговыделения по показаниям ДПЗ (погрешность переходной функции за счет погрешности накопления SLC в предыдущей кампании и погрешности расчета  $K_c$ ).

В усовершенствованном варианте расчетов ( $mf\_DPZ$ ) учтено наличие / отсутствие СВРД в трубке для детекторов.

#### **3.2 Неопределенность геометрических размеров ДПЗ**

Геометрические размеры материала эмиттера (родия), изолятора, коллектора влияют на коэффициенты чувствительности ДПЗ. Несмотря на то, что в последнее время производитель СВРД сопровождает поставляемые на АЭС СВРД информацией о геометрии и материальном составе, необходимо принять во внимание, что все эти параметры имеют некоторую неопределенность. Например, погрешность определения длины эмиттера прямо пропорционально влияет на погрешность определения  $N_{dpz}$ , а погрешность определения мощности  $N_{dpz}$ , связанная с неопределенностью диаметра эмиттера, имеет более сложную зависимость, так как она оказывает влияние на функцию учета выгорания эмиттера.

#### **3.3 Неопределенность, вносимая учетом выгорания детектора**

Немаловажную роль в определении  $N_{dpz}$  играет учет выгорания материала эмиттера ДПЗ. В настоящее время на АЭС «Козлодуй» применяется усовершенствованная функция учета выгорания ДПЗ, заданная табличным способом. Для демонстрации эффекта влияния проведены расчеты с различными способами учета выгорания материала эмиттера.

#### **3.4 Неопределенность расчета средневзвешенной мощности реактора**

Немаловажным фактором является погрешность методов определения тепловой мощности реактора ( $N_{1k}$ ,  $N_{2k}$ ,  $N_{pvd}$ ) и их статистические веса в расчете средневзвешенной мощности реактора, относительно которой определяется отклонение  $N_{dpz}$ . Следует отметить, что некоторые методы имеют систематический дрейф погрешности в ходе кампании (тренд).

Для расчета шлаков в течение кампании применяется средневзвешенная мощность реактора ( $N_{akz}$ ). Погрешность определения средневзвешенной мощности реактора незначительно, но влияет на восстановленное поле энерговыделения (за счет накопленных шлаков (SL, SLC)) и, соответственно, на расчет  $N_{dpz}$  за счет коэффициента соотношения энерговыделения в измеряемых и расчетных призмах ( $K_{dpz}$ ).

#### **3.5 Зависимость $N_{dpz}$ от точности расчетов в предыдущих кампаниях**

На погрешность определения  $N_{dpz}$  влияет корректность расчетов Хортицы-М в предыдущих кампаниях. Соответственно выявление отклонений в несколько процентов, связанных с показаниями ДПЗ, требует пересчета предыдущих кампаний. Чем точнее

необходимо получить результат, тем больше предыдущих кампаний необходимо пересчитать.

### **3.6 Неопределенность расположения ДПЗ по высоте активной зоны**

Ввиду того, что аксиальное поле энерговыделения неодинаково по высоте активной зоны и профиль поля меняется в ходе кампании, немаловажным фактором являются реальные координаты размещения ДПЗ по высоте активной зоны.

### **3.7 Неопределенность измерения концентрации борной кислоты**

Одним из входных параметров при расчете коэффициентов чувствительности ДПЗ в процессе эксплуатации РУ является концентрация борной кислоты в теплоносителе первого контура. Неопределенность измерения или ошибка в учете концентрации борной кислоты может привести к ошибке в коэффициенте чувствительности ДПЗ и, как следствие, к ошибке в определении  $N_{dpz}$ .

## **4 Описание метода тестирования**

Во всех тестах использовались токи ДПЗ и другие измеренные параметры из архивов АЭС «Козлодуй» и АЭС «Тяньвань». Производить расчеты каждые 5 секунд (периодичность расчетов на энергоблоке) для множества вариаций расчетов и многих кампаний не представлялось возможным. В связи с тем, что  $N_{dpz}$  является интегральной характеристикой восстановления поля энерговыделения, и в связи с тем, что в рамках предполагаемого исследования планировалось оценивать влияние различных факторов в масштабах нескольких кампаний, приняты следующие основные решения:

- выборка необходимых данных производилась с периодичностью 24 часа;
- для исключения ошибки в накоплении шлаков за счет изменения мощности реактора внутри периода выборки, производилась необходимая коррекция.

## **5 Анализ значений мощности реактора, определенных разными методами, при эксплуатации РУ**

Поскольку в процессе эксплуатации РУ  $N_{dpz}$  сравнивается со средневзвешенной мощностью активной зоны и на основании этого сравнения формируется мнение о точности расчета мощности по ДПЗ, т.е. средневзвешенная мощность выступает в роли некоторого эталона, авторы работы решили провести анализ показаний всех способов определения тепловой мощности в процессе эксплуатации РУ.

В таблицах (Таблица 1, Таблица 2) приведено отклонение  $N_{1k}$  от  $N_{2k}$  АЭС «Козлодуй» в процентах для исследуемых кампаний. В таблицах приведено:

- усредненные значения диапазонов по 50 эффективным суткам;
- среднее отклонение  $N_{1k}$  от  $N_{2k}$  за кампанию (avg);
- разность отклонений между концом и началом кампании (d);
- среднее значений отклонений за кампании (с 13 по 22 (Avg13-22) для 5 блока, с 12 по 20 (Avg12-20) для 5 блока)

23 кампания 5 блока приведена только для первых 12 эффективных суток.

21 кампания 6 блока приведена только для первых 100 эффективных суток.



Таблица 4 - Таблица статистических весов при расчете средневзвешенной мощности для блока № 6.

	K12	K13	K14	K15	K16	K17	K18	K19	K20
N1K	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		1.0	0.32
N2K	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		1.0	1.0
Npvd	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		0.56	1.0
Ndpz	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0		0.56	0.9
Nik	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0

Тренд изменения Ndpz влияет на тренд Nakz и уменьшает тренд Ndpz при рассмотрении Ndpz относительно Nakz. Для выявления тренда изменения погрешности Ndpz в ходе кампании проводилось сравнение мощности Ndpz со средним значением тепловой мощности реактора, рассчитанной по двум, наиболее стабильным по ходу кампании (для целей изучения тренда Ndpz), методам с одинаковым весом: N2k и Npvd.

Среднее значение выбранных методов обозначено как N2kPvd.

В таблицах (Таблица 5, Таблица 6) приведены статистические веса при расчете средневзвешенной мощности реактора для блока № 1, 2 АЭС «Тяньвань». Для блока № 2 во всех кампаниях применялись одинаковые статистические веса.

Таблица 5 - Таблица статистических весов при расчете средневзвешенной мощности для блока № 1 АЭС «Тяньвань»

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
N1k	0.91	0.91	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63
N2k	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Npvd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ndpz	0.53	0.00	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42
Nik	0.50	0.50	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51

Таблица 6 - Таблица статистических весов при расчете средневзвешенной мощности для блока № 2 АЭС «Тяньвань»

	(1)
N1K	0.64
N2K	1.00
Npvd	0.00
Ndpz	0.47
Nik	0.58

В таблицах (Таблица 7, Таблица 8) приведено отклонение N1k от N2k АЭС «Тяньвань» в процентах для кампаний с 1 по 8.

В таблицах приведено:

- усредненные значения диапазонов по 50 эффективным суткам;
- среднее отклонение N1k от N2k за кампанию (avg);
- разность отклонений между концом и началом кампании (d);
- среднее значений отклонений за кампании (Avg1-8)

Таблица 7. Отклонение N1k от N2k 1 блока АЭС «Тяньвань»

Т.эф	N1K-1	N1K-2	N1K-3	N1K-4	N1K-5	N1K-6	N1K-7	N1K-8	Avg1-8
0-50	-	-0.5	-1.2	-1.5	-1.7	-1.8	-2.1	-1.7	-1.5
100-150	-	-1.1	-1.3	-1.6	-1.4	-1.8	-1.9	-1.5	-1.5
200-250	-	-1.4	-1.4	-2.0	-1.8	-2.0	-2.0	-1.5	-1.7
250-300	-	-1.4	-1.5	-1.7	-1.9	-2.0	-2.5	-1.6	-1.8
Avg	-	-1.1	-1.3	-1.7	-1.7	-1.9	-2.1	-1.6	-1.6
d	-	-0.8	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.4	0.2	-0.3

Таблица 8. Отклонение N1k от N2k 2 блока АЭС «Тяньвань»

Т.эф	N1K-1	N1K-2	N1K-3	N1K-4	N1K-5	N1K-6	N1K-7	N1K-8	Avg1-8
0-50	-1.3	-1.9	-1.9	-2.5	-2.3	-2.0	-2.7	-3.1	-2.2
100-150	-1.7	-2.3	-2.5	-2.6	-2.2	-2.1	-3.0	-2.9	-2.4
200-250	-1.9	-2.4	-2.7	-2.8	-2.3	-2.3	-3.1	-2.9	-2.5
250-300	-	-2.6	-2.6	-3.0	-2.3	-2.4	-3.4	-2.7	-2.7
avg	-1.6	-2.3	-2.4	-2.7	-2.3	-2.2	-3.0	-2.9	-2.4
d	-0.5	-0.6	-0.6	-0.5	0	-0.4	-0.7	0.5	-0.4

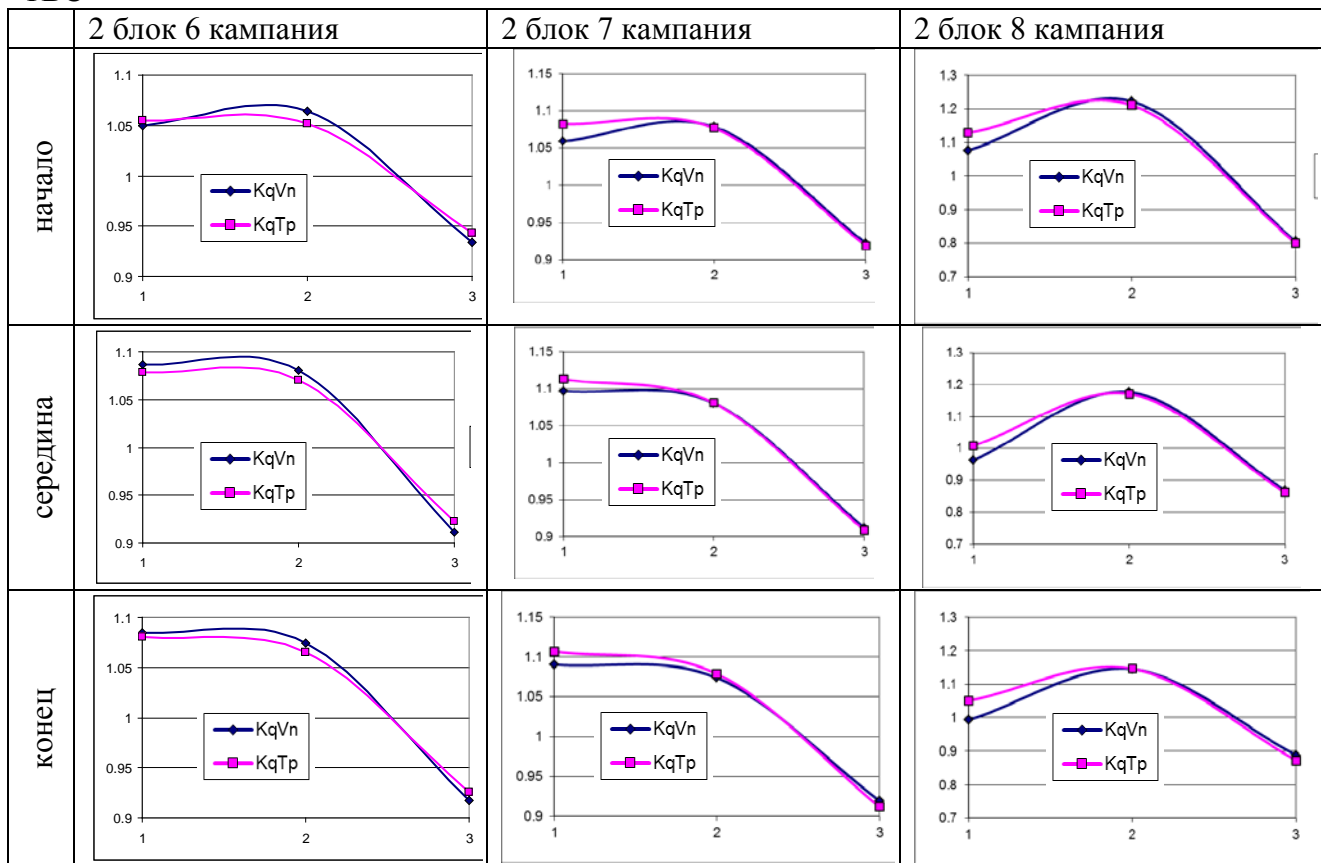
Из таблиц (Таблица 7, Таблица 8) видно:

- значение N1k всегда меньше N2k (в среднем на 1.6% для 1 блока и на 2.4% для 2 блока);
- существует незначительный тренд за кампанию (в среднем примерно до -0.4%);
- в 8 кампании обоих блоков тренд имеет другой знак

Из приведенных данных видно, что в отличие от аналогичных отклонений N1k, Nakz от N2k для АЭС «Козлодуй» значимый тренд отклонений N1k от N2k не наблюдается. Видимо сказывается лучшее качество измерения температуры в горячих нитках.

Как сказано выше, в 8 кампании обоих блоков тренд отклонения N1k от N2k имеет другой знак. Проведён анализ радиального распределения энерговыделения активной зоны на основе данных надзонного термоконтроля и восстановленного поля энерговыделения по показаниям ДПЗ. На рисунках, представленных в таблице (Таблица 9), показано относительное распределение по условным орбитам усредненных относительных мощностей ТВС, определенных по подогреву в ТВС ( $KqT_p$ ) и по восстановленному полю энерговыделения ( $KqV_n$ ) для начала, середины и конца кампаний. По оси X номер условной орбиты активной зоны: 1- центральная часть (ширина орбиты около 3-х рядов ТВС); 2- средняя часть (ширина орбиты около 3-х рядов ТВС); 3- периферийная часть (ширина орбиты около 2-х рядов ТВС).

Таблица 9 Распределение по условным орбитам усредненных относительных мощностей ТВС



Из представленных рисунков в таблице (Таблица 9) видно, что изменение радиального распределения в 8 кампании отличается от предыдущих кампаний. Возможно это повлияло на тренд N1k.

Для выявления тренда изменения погрешности Ndpz в ходе кампании проводилось сравнение мощности Ndpz со средним значением тепловой мощности реактора, рассчитанной по двум наиболее стабильным во времени методам с одинаковым весом: N1k и N2k. Среднее значение выбранных методов обозначено как N1kN2K. Несмотря на имеющийся тренд N1k решено не исключать N1k из анализа Ndpz. Метод N1k решено не учитывать по причине периодической калибровки на Nakz (описано выше в этом разделе).

При анализе значения Ndpz всех энергоблоков следует учитывать, что погрешность определения средневзвешенной мощности составляет около 2 %.

## 6 Обобщение отклонений Ndpz

На рисунках раздела 6 приведены отклонения Ndpz, рассчитанной имитационными расчетами, от N2kPvd и от N1kN2k на начало и конец кампании для рассмотренных кампаний.

В приведенных в разделе рисунках конец кампании по временной оси совпадает с началом следующей. При определении значений в начале и конце кампании не использовались значения на пониженной мощности. Проводилась экстраполяция полученных результатов на начало или конец кампании для корректного выявления тренда Ndpz. Точность определения каждой обобщающей точки на начало и конец кампании можно ориентировочно оценить около  $\pm 0.2\%$ .





Рисунок 1 - Отклонение Ndpz от N2kPvd (блок № 5 АЭС «Козлодуй»)

Анализ отклонений Ndpz блока № 5 в 13 и 14 кампаниях и в начале 15 кампании показал, что имеет место более высокий разброс между различными методами определения мощности N1k, N2k, Npvd по отношению к другим кампаниям обоих блоков. Из представленных рисунков видно, что отклонение Ndpz начиная с 21 кампании (установлена новая партия ДПЗ) увеличилось в начале кампании до 2.5%. Тренд отклонений для 21 и 22 кампаний сохранился.

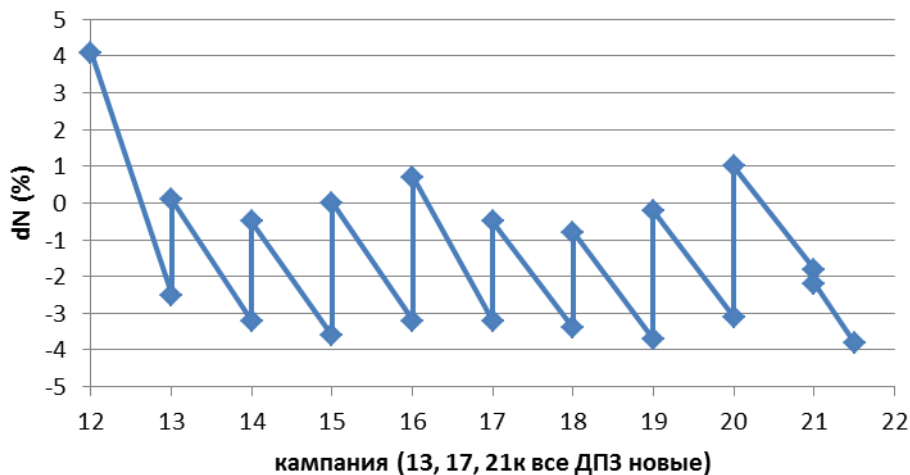


Рисунок 2 - Отклонение Ndpz расчета от N2kPvd (блок № 6 АЭС «Козлодуй»)

Из представленных рисунков для обоих блоков (Рисунок 1 - Рисунок 2) видно, что отклонение Ndpz блока № 5 и блока №6 начиная с 21 кампании (установлены новые партии ДПЗ) увеличилось в начале кампании до 2%. Тренд отклонений для всех кампаний сохранился.

На рисунке (Рисунок 3) показано отклонение Ndpz от N2kPvd в начале кампаний на номинальной мощности. На рисунке обозначено:

50(N2kPwd)\_5 - отклонение Ndpz блока № 5;

50(N2kPwd)\_6 - отклонение Ndpz блока № 6

В 13, 17, 21 кампании были установлены новые ДПЗ на обоих блоках.

Характерным моментом рисунка (Рисунок 3) является то, что в начале 21 кампании на обоих блоках произошло «нетипичное» отклонение Ndpz. Для обоих блоков в 21 кампании использовались новые СВРД из одной поставки. Ndpz 13 кампании завышена примерно на 2.8%, возможно за счет погрешности определения Nakz (большой разброс между разными методами)

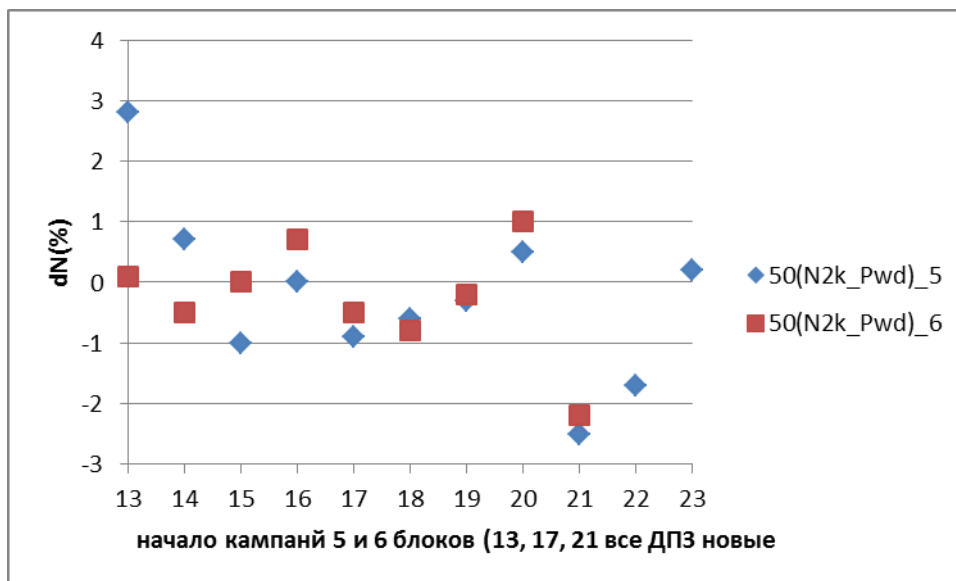


Рисунок 3 - Отклонение Ndpz от N2kPvd в начале кампаний (блок № 5 и 6)

Из представленных данных видно, что результаты расчетов с разными партиями СВРД имели хорошую повторяемость, корректные индивидуальные характеристики ДПЗ и хорошую согласованность коэффициентов чувствительности и индивидуальных характеристик ДПЗ за исключением результатов начиная с 21 кампании 5 и 6 блоков.

Из рисунка (Рисунок 3) видно, что отклонение Ndpz в последующие кампании после замены всех ДПЗ на новые отличается от отклонения в первый год эксплуатации ДПЗ. Особенно характерно это видно после 17 и 21 кампании. Более подробно этот факт описан в разделе (7.2, 7.2).

Тщательный анализ отклонений в 21 кампании 5 блока и в 21 кампании 6 блока был проведен как при пуске реактора, так и в дальнейшем. Неоднократно запрашивались данные у производителя СВРД, сверялись рентгенограммы ДПЗ, проверялись исходные данные. В текущей работе, как указывалось выше, расчёты проводились одним расчетным комплексом, нейтронно – физические константы и коэффициенты чувствительности ДПЗ однотипные для всех кампаний. СКО методов определения средневзвешенной мощности незначительно отличается от других рассматриваемых кампаний.

Тем не менее, Ndpz начиная с 21 кампании занижено по отношению ко всем результатам, полученным по блоку № 5 и блоку № 6, что говорит скорее о свойствах новой партии СВРД, чем об ошибках в подготовке данных. Для более глубокого анализа ситуации необходимо более детально проанализировать различия партий СВРД при участии изготовителя.

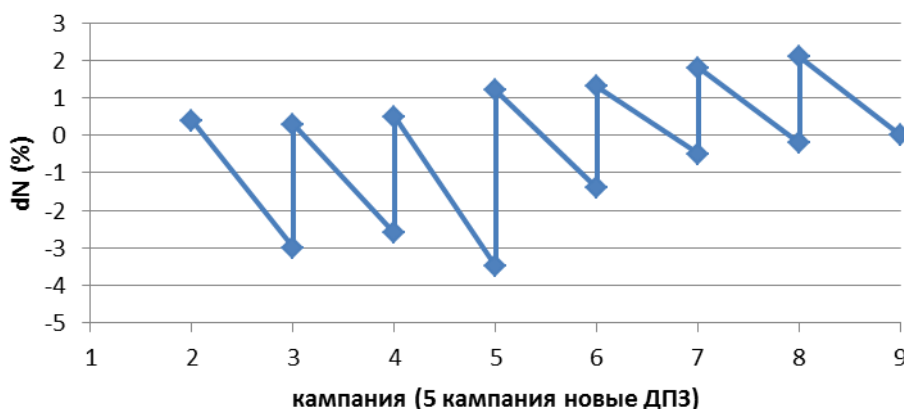


Рисунок 4 - Отклонение Ndpz от N1kN2k (блок № 1 АЭС «Тяньвань»)

Из приведенных рисунков видно, что отклонение  $N_{dpz}$  в конце 4 кампании несколько увеличено (выбивается из общей картины). В этой кампании имел место разброс между различными методами расчета мощности (включая скачкообразное изменение).

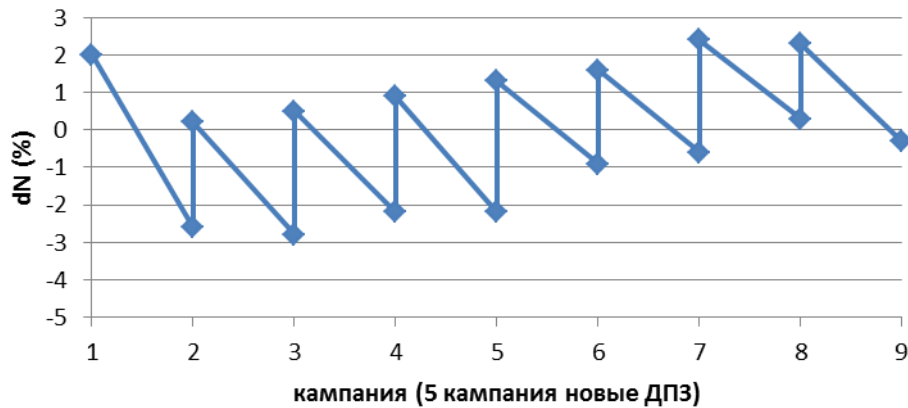


Рисунок 5 - Отклонение  $N_{dpz}$  от  $N_{1kN2k}$  (блок № 2 АЭС «Тяньвань»)

Из представленных данных видно, что результаты расчетов с разными партиями СВРД имели хорошую повторяемость, корректные индивидуальные характеристики ДПЗ и хорошую согласованность коэффициентов чувствительности и индивидуальных характеристик ДПЗ.

## 7 Анализ изменения отклонения $N_{dpz}$ от $N_{akz}$ во времени (тренд $N_{dpz}$ и выгорание ДПЗ)

### 7.1 Тренд отклонения $N_{dpz}$ от $N_{akz}$ за одну кампанию

Анализ данных показал, что тренд отклонения  $N_{dpz}$  за одну кампанию имеют стабильный характер и хорошую повторяемость во всех кампаниях. Усредненное значение тренда за кампанию составляет:

- для АЭС «Козлодуй» примерно 3%;
- для АЭС «Тяньвань» примерно 2.7%

### 7.2 Учет выгорания ДПЗ за несколько кампаний

Немаловажным фактором изменения отклонения  $N_{dpz}$  от  $N_{akz}$  во времени (время эксплуатации ДПЗ во всех кампаниях) является учет выгорания ДПЗ.

На рисунке (Рисунок 6) приведен пример огибающей отклонений  $N_{dpz}$  расчета от  $N_{2kPvd}$  АЭС «Козлодуй».

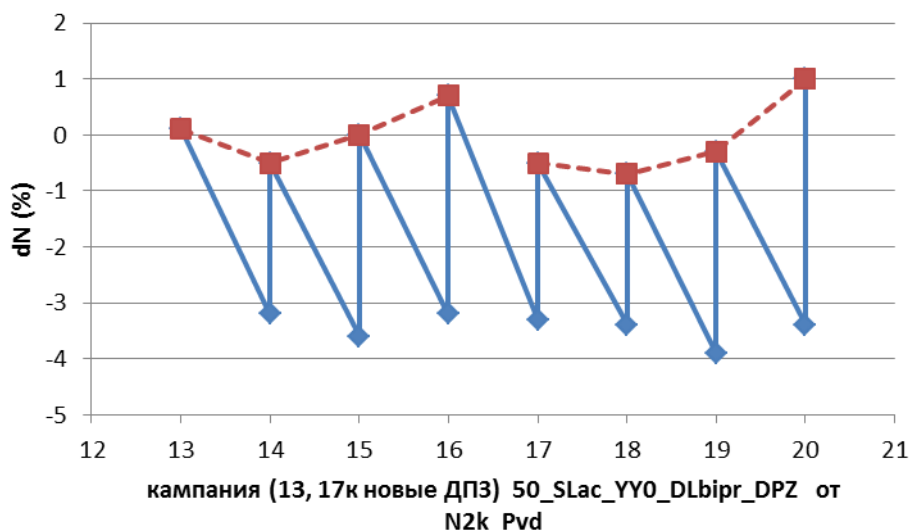


Рисунок 6 - Огибающая отклонений Ndpz от N2kPvd. Блок № 6, АЭС «Козлодуй»

Анализ результатов показывает, что наблюдается тенденция к увеличению Ndpz по мере выгорания ДПЗ. Ориентировочно за три года эксплуатации ДПЗ отклонение Ndpz третьего года эксплуатации отличается от отклонения первого года эксплуатации на 1.3%.

## 8 Заключение

В процессе работы проведены имитационные расчеты восстановления поля энерговыделения активной зоны РУ по показаниям ДПЗ и расчеты мощности реактора по ДПЗ с использованием данных эксплуатации следующих энергоблоков:

- блоки № 5 и № 6 АЭС «Козлодуй». Расчеты проведены по данным одиннадцати топливных кампаний энергоблока № 5 и десяти топливных кампаний энергоблока № 6. За этот период в активных зонах обоих энергоблоков эксплуатировались четыре партии СВРД (срок эксплуатации СВРД в активной зоне составляет 4 года) и две партии СВРД, которые продолжают эксплуатироваться. Расчеты проводились с вариацией различных параметров, которые могли оказать влияние на расчет мощности по показаниям внутрореакторных детекторов. Проведено сопоставление данных, полученных в результате расчетов. Данные сопоставлялись в различных комбинациях между собой, а также с архивными данными, полученными в процессе эксплуатации на энергоблоке.
- блоки №1 и № 2 АЭС «Тяньвань». Расчеты проведены по данным семи топливных кампаний энергоблока № 1 и восьми топливных кампаний энергоблока № 2. За этот период в активных зонах обоих энергоблоков эксплуатировались четыре партии СВРД (срок эксплуатации СВРД в активной зоне составляет 4 года).

В процессе работы выявлены закономерности отклонения мощности Ndpz от средневзвешенной мощности реактора, а также выявлены наиболее значимые факторы, влияющие на точность определения Ndpz.

Немаловажным фактором является погрешность методов определения тепловой мощности реактора (N1k, N2k, Nik, Npvd), относительно которых определяется отклонение Ndpz.

Данные отчета показывают, что оправдано применение индивидуальных коэффициентов чувствительности ДПЗ для каждого диаметра эмиттера и уточненных геометрических размеров ДПЗ и их смещений. Применение индивидуальных коэффициентов ДПЗ уменьшили отклонения, вызванные применением СВРД, принадлежащих разным партиям изготовления и имеющим разные характеристики. Применение уточненной функции учета выгорания ДПЗ (учитывающей индивидуально-технические характеристики каждой партии СВРД) существенно улучшает качество расчета Ndpz.

Принципиальным результатом учета новой функции выгорания во всех кампаниях является то, что все тренды отклонений стали типичными и минимизировалось занижение Ndpz при установке новых СВРД, а также уменьшилось завышение линейного энерговыделения при увеличении протекших зарядов (со второго года эксплуатации СВРД). При проведении анализа влияния новой функции выгорания на Ndpz выявлен незначительный тренд отклонения Ndpz от Nakz за несколько кампаний. Наблюдается тенденция увеличения Ndpz по мере выгорания ДПЗ.

Из приведённых данных для АЭС «Козлодуй» следует:

- разброс значений методов определения мощности реактора может достигать 6% (без учета Ndpz) и 7% с учетом Ndpz;
- довольно часто N1k отличается от Nakz до 3% и имеет тренд по ходу кампании;
- тренды изменения N1k и Ndpz во времени, как правило, направлены в одну сторону, влияют на Nakz (занижают Nakz к концу кампании примерно на 1%) и уменьшают тренд Ndpz при рассмотрении Ndpz относительно Nakz;
- разброс значений мощности реактора, определенной различными способами, уменьшается к концу кампании.

Для выявления тренда изменения погрешности Ndpz по ходу кампании для АЭС «Козлодуй» выбрано среднее значение тепловой мощности, определяемой по двум методам N2k и Npvd (N2kPvd).

Проведены тестовые расчеты, выявляющие влияние положения ДПЗ на значение Ndpz, тренда Ndpz и на значение аксиального офсета. Полученные результаты подтверждают, что необходимо знать точное расположение ДПЗ в активной зоне реактора на основании проведенных геометрических измерений и технической документации.

В работе проведен анализ отклонений Ndpz в зависимости от используемой партии СВРД для АЭС «Козлодуй». Анализ отклонений Ndpz от Nakz при использовании новой партии СВРД на блоках № 5 и № 6 в 21 кампанию показал, что отклонение увеличилось практически в два раза по отношению к другим четырём партиям СВРД. Подытожив данные анализа партий СВРД для АЭС «Козлодуй» можно с большой вероятностью предположить, что нарушена повторяемость партии СВРД, применяемой в 21 кампании блоков № 5 и № 6.

Из приведённых данных для АЭС «Тяньвань» следует:

- в отличие от аналогичных отклонений N1k, Nakz от N2k для АЭС «Козлодуй» значимый тренд отклонений N1k от N2k не наблюдается. Видимо сказывается лучшее качество измерения температуры в горячих нитках;
- тренд отклонения Ndpz присутствует во всех кампаниях. Тренд изменения Ndpz влияет на тренд Nakz и уменьшает тренд Ndpz при рассмотрении Ndpz относительно Nakz;

Для выявления тренда изменения погрешности Ndpz для АЭС «Тяньвань» в ходе кампании проводилось сравнение мощности Ndpz со средним значением тепловой мощности реактора, рассчитанной по двум наиболее стабильным во времени методам: N1k и N2k. Среднее значение выбранных методов обозначено как N1kN2K. Метод N1k решено не учитывать.

Для улучшения метрологических характеристик ППО СВРК разработан усовершенствованный модуль мелкосеточного расчета, учитывающий наличие СВРД в направляющей трубке ТВС для СВРД (метод mf\_DPZ).

При применении усовершенствованного метода mf\_DPZ:

- уменьшается погрешность определения энерговыделения твэлов, окружающих СВРД, примерно на 2.5 %;
- уменьшается отклонение Ndpz от Nakz (среднее по всем кампаниям и блокам):
  - 1) в начале кампании на 0.44%;
  - 2) в конце кампании на 1.03%;
  - 3) в среднем за кампанию 0.7%

- уменьшается тренд отклонения Ndpz от Nakz (среднее по всем кампаниям и блокам) на 0.7%

При анализе значения Ndpz следует учитывать, что погрешность определения средневзвешенной мощности составляет около 2 %.

Проведен анализ влияния неопределенности средневзвешенной мощности реактора на значение Ndpz (за счет накопленных шлаков). Погрешность определения Nakz (- 2%) приводит к погрешности Ndpz к концу кампании примерно (+ 0.25%). Погрешность определения Nakz (+ 2%) приводит к погрешности Ndpz к концу кампании примерно (- 0.25%).

Проведен анализ влияния неопределенности в измерении концентрации бора в теплоносителе первого контура на значение Ndpz. Проведенная оценка демонстрирует:

- слабую зависимость Ndpz от неопределенности измерения концентрации бора при корректной работе боромера;
- некорректная работа боромера без сопровождения результата измерения признаком достоверности может приводить к значительным скачкам в мощности, определенной по показаниям ДПЗ.

Проведен анализ изменения отклонения Ndpz во времени (тренд Ndpz) от других методов определения мощности реактора. Тренд Ndpz исследовался:

- для АЭС «Козлодуй» относительно N2kPvd;
- для АЭС «Тяньвань» относительно N1kN2k.

Величины, относительно которых рассматривается Ndpz, выбраны потому, что они имеют незначительный тренд по ходу кампании для конкретного энергоблока. Тренды отклонения Ndpz за одну кампанию имеют стабильный характер и хорошую повторяемость во всех кампаниях. Усредненное значение тренда за кампанию составляет:

- для АЭС «Козлодуй» примерно 3%;
- для АЭС «Тяньвань» примерно 2.7%.

Для выявления фактора, влияющего на тренд Ndpz производилось отключение групп ДПЗ (слой ДПЗ и сочетание слоев ДПЗ 1÷7) для выявления закономерности. Не выявлено связи тренда отклонения Ndpz и групп отключения ДПЗ.

В настоящий момент выявить однозначную причину тренда Ndpz не удалось, так как довольно много факторов могут влиять на тренд, а значение тренда (~ 2.7 %) сопоставимо с погрешностью Ndpz. Из факторов, которые могут влиять на тренд можно перечислить следующие:

- погрешности расчета в 1 и 16 слоях при изменении профиля поля по ходу кампании;
- влияние концентрации борной кислоты на коэффициенты чувствительности;
- погрешность расчета нейтронно – физических констант;
- погрешность расчета коэффициентов чувствительности ДПЗ.

По всей видимости, необходимо применить адаптационный коэффициент поправки, компенсирующий неопределенности, основанный на опыте эксплуатации многих кампаний разных энергоблоков.

## ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

Kc	–отношение средней мощности 6 твэлов, окружающих трубку для СВРД, к средней мощности твэла в ТВС;
Kdpz	–коэффициент соотношения энерговыделения в измеряемых и расчетных призмах;
N1k	–мощность реактора, рассчитанная по параметрам теплоносителя первого контура;
N1kN2k	–мощность реактора, рассчитанная как среднее значение N1k и N2k;
N2k	–мощность реактора, рассчитанная по параметрам теплоносителя в парогенераторе;
N2kPvd	–мощность реактора, рассчитанная как среднее значение N2k и Npvd;
Nakz	–средневзвешенное значение мощности реактора ( <u>извлеченное из архива АЭС</u> );
Ndpz	–мощность реактора, рассчитанная по параметрам внутриреакторных детекторов;
Npvd	–мощность реактора, рассчитанная по параметрам теплоносителя в нитках ПВД;
SL	–глубина выгорания участка ТВС;
SLC	–глубина выгорания 6 твэлов, окружающих трубку для СВРД;
ДПЗ	–датчик прямой зарядки;
ПВД	–подогреватель высокого давления;
СВРД	–сборка внутриреакторных детекторов;
СВРК	–система внутриреакторного контроля;
СКО	–среднеквадратичное отклонение значений;
ТВС	–тепловыделяющая сборка;
твэл	–тепловыделяющий элемент;