

# **КОНТРОЛЬ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА В ПЕРИОД ЗАГРУЗКИ ТОПЛИВА В АКТИВНУЮ ЗОНУ РЕАКТОРА БЛОКА №1 ТЯНЬВАНЬСКОЙ АЭС**

**О.С.Сударев, А.А.Семенihin, С.Н.Нистратов**  
**ФГУП «Фирма «Атомтехэнерго», г. Мытищи**

## **1 ВВЕДЕНИЕ.**

При пуске блоков атомных станций в Китае до настоящего времени применялась, наиболее распространенная в мире для реакторов PVR, технология использования «внешнего источника нейтронов в активной зоне» (формулировка из доклада миссии МАГАТЭ 2003г) для контроля нейтронного потока при операциях по загрузке топлива в активную зону и при первом достижении критического состояния. Естественно, у китайского Заказчика было много вопросов, и даже сомнений, к применяемой при пуске блоков с реакторами российской поставки технологии пуска без внешнего источника. К тому же, в китайских правилах ядерной безопасности предусмотрено использование «внутриреакторного источника» (формулировка из HAF304 «Пусконаладочные работы на атомных электростанциях») с оговоркой «при необходимости».

## **2 АППАРАТУРА.**

Для обеспечения безопасности пуска и контроля нейтронного потока в подкритическом состоянии на загрузке топлива на Тяньваньской АЭС использовались три различных системы контроля:

1. каналы системы контроля перегрузки СКП (6 каналов) с блоками детектирования на основе ионизационных камер КНК-15 (камера нейтронная с компенсацией гамма-фона), работающих в импульсном режиме, размещенными в корпусе реактора;
2. каналы аппаратуры физического пуска АФП (4 канала) – сборки счетчиков СНМ-18-1 (счетчик нейтронов медленных), по 3 шт в сборке, размещенные в бетонной защите реактора. АФП применяется на каждом пускаемом блоке однократно на подэтапе «Физический пуск реактора» в связи с минимальным (близким к нулевому фоновому значению) уровнем плотности нейтронного потока в активной зоне, загруженной свежими ТВС;
3. каналы аппаратуры контроля нейтронного потока в диапазоне источника ДИ - сборки счетчиков СНМ-11 (счетчик нейтронов медленных), по 5 шт в сборке, размещенные в бетонной защите реактора.

Расположение каналов показано на рисунке 1.

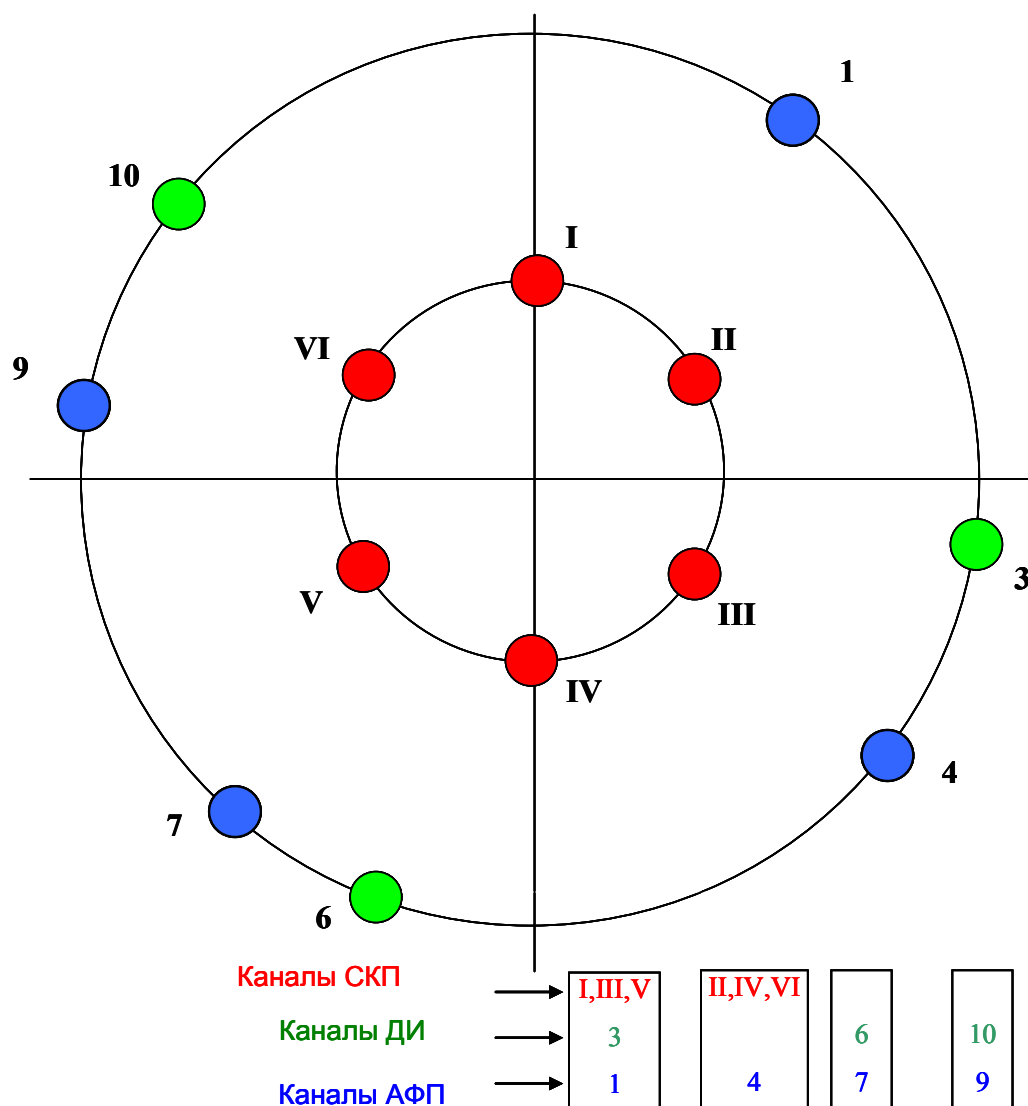


Рис. 1. Схема расположения каналов контроля нейтронного потока

На Тяньваньской АЭС китайским Заказчиком и комиссией МАГАТЭ уделялось особое внимание обоснованию безопасности физического пуска реактора «без источника» и, в связи с этим, контролю состояния активной зоны подкритического реактора, в том числе, при загрузке топлива. Для выполнения требований российских и китайских правил ядерной безопасности (ПБЯ РУ АС-89; HAF304) о том, что каналы контроля плотности нейтронного потока при загрузке должны быть оснащены показывающими и записывающими устройствами, были приняты дополнительные к проекту меры.

Чем не устраивал проект системы АКНП для ТАЭС типа АКНП-16R.

1. Показывающие устройства:

- дисплеи АКНП на БЩУ показывают только цифровые показания каналов СКП и ДИ и их представление в форме гистограмм. При малых, почти нулевых сигналах и большом шуме невозможно определить развитие процесса во времени и реакцию на загрузку отдельной ТВС.
- оптико-акустический сигнализатор BSR-40R выдает сигнал о достижениях предупредительной и аварийной уставок, которые на 3 порядка

выше реального уровня сигнала. Понижение уставки приводит к частому срабатыванию предупредительной и аварийной уставок и остановке загрузки. Постоянно работающая звуковая сигнализация на столь малой частоте (1 раз в 2-4 минуты) не позволят ориентироваться в процессе.

## 2. Записывающие устройства.

- В составе АКНП имеется аппаратура отображения и протоколирования (АОП), в которой обеспечивается отображение зависимости контролируемых параметров (в том числе СКП,) во времени в динамическом режиме в виде графиков. Для дополнительной системы АФП – отображение не обеспечивается. Но работает эта функция не в режиме реального времени, а в режиме отображения данных из архивного файла. Расположен АОП в отдельном помещении, далеко от БЩУ и центрального зала, без телефонной связи и в нем, естественно, не предусмотрено дежурство контролирующего физика или оператора. Значит, оперативная информация и реакция на изменение показаний невозможна.

Для преодоления вышеназванных недостатков была разработана и реализована система (персональный компьютер-ноутбук, программное обеспечение, линии связи) оперативного контроля нейтронного потока на рабочем месте дежурного руководителя физпуска в центральном зале, основного ответственного лица Поставщика за контроль параметров и ядерную безопасность. Система предусматривала оперативное графическое представление показаний каналов контроля нейтронного потока, сигнализацию срабатывания уставок, архивирование данных. Система позволяла также отражать последовательность операций по загрузке топлива и текущее (изменяющееся при установке каждой ТВС) представление картограммы активной зоны.

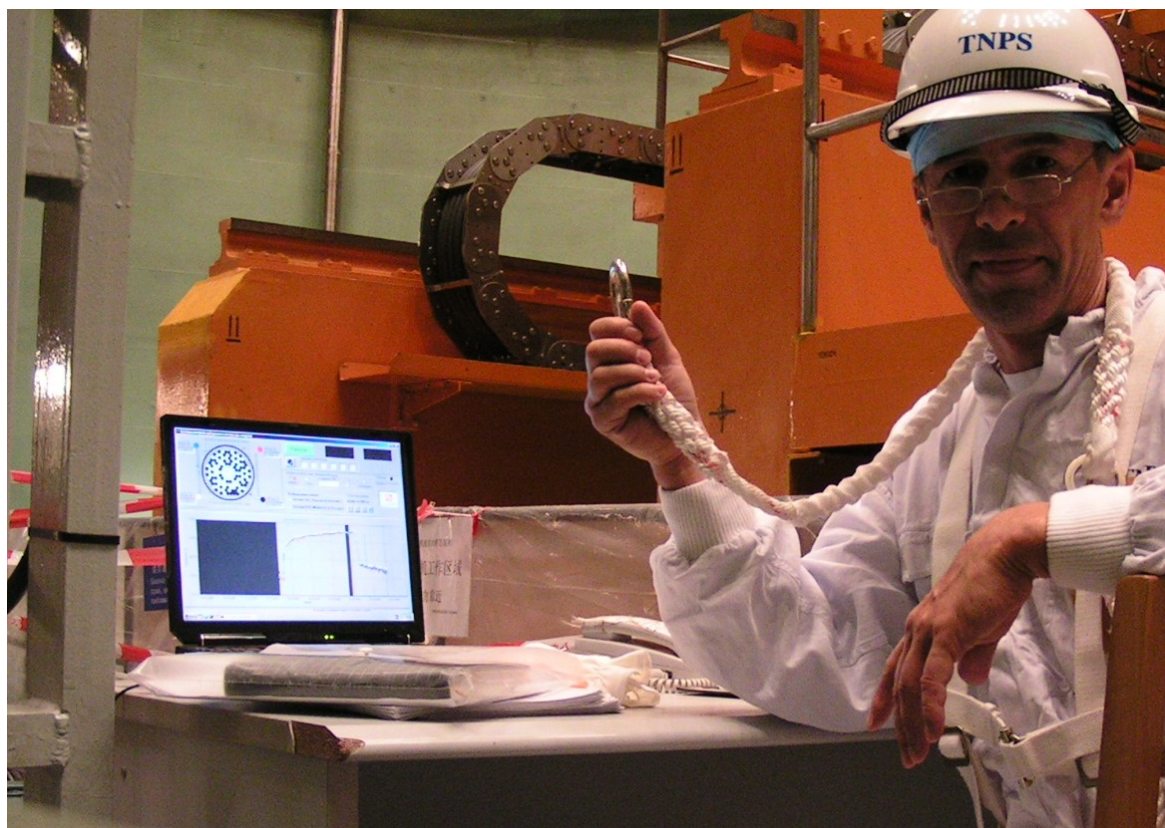


Рис. 2. Фотография рабочего места ДРФ в центральном зале.

За спиной ДРФ – перегрузочная машина, стоящая на реакторе. На столе – компьютер с показаниями каналов АФП и текущей картограммой загружаемой активной зоны.

### 3 ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАБОТ ПО ЗАГРУЗКЕ.

Как принято на российских блоках ВВЭР, загрузка производится в три этапа:

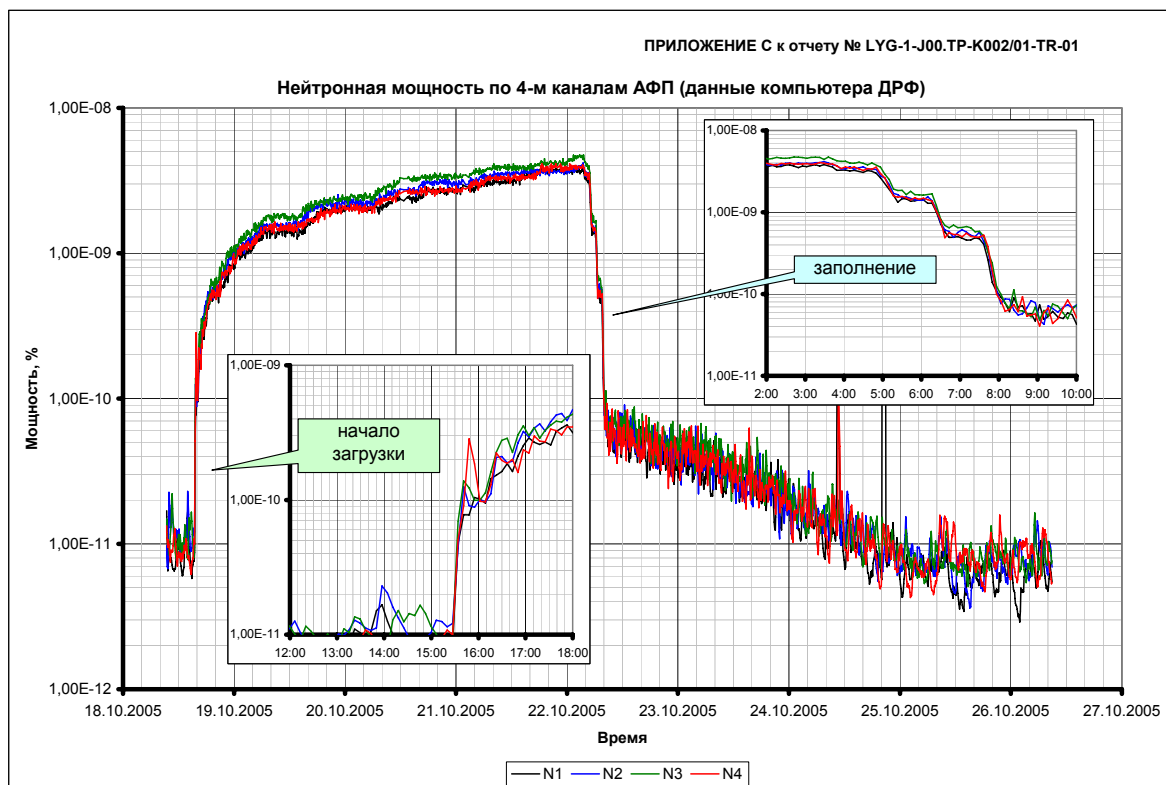
На первом, в активную зону, не заполненную борным раствором, загружаются 60 ТВС;

На втором, корпус реактора заполняется раствором борной кислоты до уровня верха активной зоны. Концентрация борной кислоты – не ниже 16 г/кг для обеспечения ядерной безопасности и не выше 18 г/кг для обеспечения возможности контроля нейтронного потока подкритичной активной зоны. При загрузке концентрация была в интервале 17,02-17,28 г/кг. Заполнение производится шагами, с изменением уровня приблизительно на 0,8 м.

На третьем, производится дозагрузка 103-х ТВС, до штатного количества 163 ТВС.

### 4 РЕЗУЛЬТАТЫ.

На рисунках 3-5 приведены результаты контроля нейтронного потока при загрузке активной зоны блока №1 Тяньваньской АЭС.



На рисунке 3 показан график показаний нейтронной мощности по каналам АФП в единицах «%» (от номинальной мощности реактора). На графике можно выделить 5 характерных участков.

Первый участок (тоже самое – на последнем участке) – «нулевые» фоновые показания на уровне  $0,6-1,0 \cdot 10^{-11}\%$ .

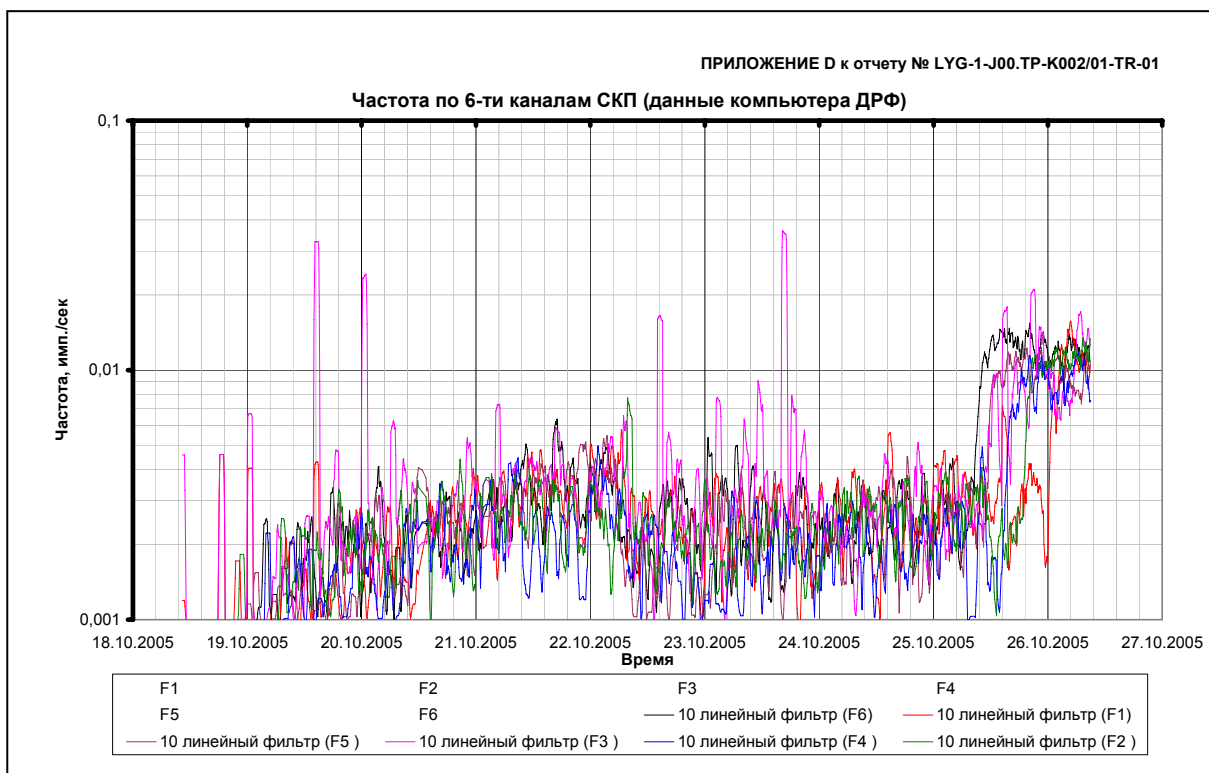
Второй, начальный участок нелинейного роста показаний – выход каналов АФП на устойчивые показания. Загрузка 1-ой, центральной ТВС дает скачок показаний

сразу на порядок, до  $1 \cdot 10^{-10}\%$ , затем в ходе загрузки еще 18-ти ТВС (весь чехол №1) каналы выходят на устойчивые показания.

Третий участок: медленный линейный (пропорционального росту нейтронного потока) рост показаний до  $4\text{-}5 \cdot 10^{-9}\%$  при «сухой» загрузке до 60-ти ТВС.

Четвертый участок: заполнение борным раствором 4-мя шагами (первые три по 85-90 см, последний, 25-30 см). Показания снижаются до  $6 \cdot 10^{-11}\%$ .

Пятый участок: медленное снижение показаний при повышении уровня раствора борной кислоты, вследствие эффекта вытеснения жидкости при загрузке ТВС. Участок заканчивается возвращением на фоновые показания при загрузке приблизительно 133-й ТВС.



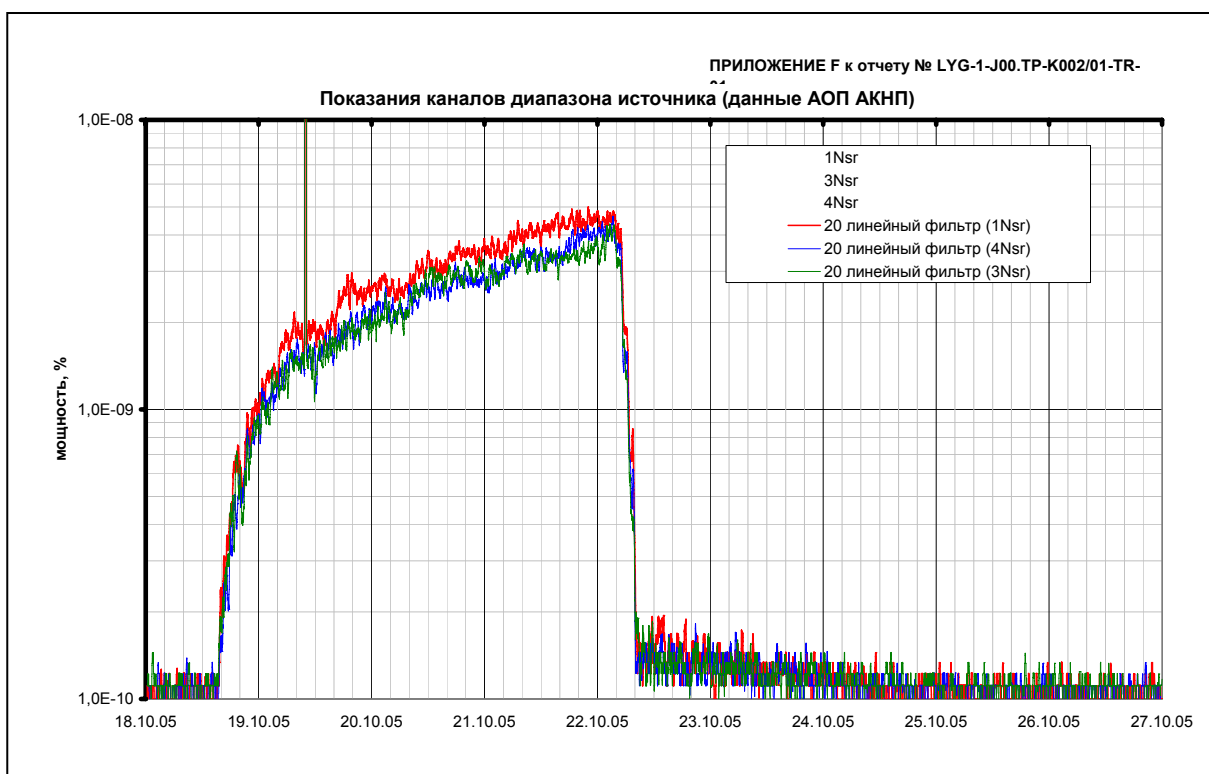
Ри. 4. Показания каналов СКП

На рисунке 4 показан график показаний нейтронной мощности по каналам СКП в единицах частоты «импульс/сек».

График показаний СКП имеет особенности, по сравнению с АФП.

Первое. Показания характеризуются большим шумом (график построен с линейной фильтрацией по 100 точкам), вследствие которого контроль отдельных операций по загрузке ТВС или заполнению активной зоны борным раствором затруднителен в течении почти всей загрузки.

Второе. На завершающей стадии загрузки, когда устанавливаются ТВС периферийного ряда, происходит быстрое увеличение показаний в 3-5 раз в канале, в непосредственной близи от которого устанавливается ТВС.



Ри. 5. Показания каналов ДИ

На рисунке 5 показан график показаний нейтронной мощности по каналам ДИ в единицах частоты «импульс/сек». График, в принципе, повторяет форму графика АФП.

Из графиков видно, что весь период загрузки процесс проходил при ненулевых (выше фоновых) показаниях либо одной, либо другой из систем контроля. Такой результат достигнут впервые.

## 5 ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА.

Второе важное достижение на Тяньваньской АЭС, кроме показаний выше фона, является, впервые примененное на рабочем месте дежурного руководителя физпуска (ДРФ) в центральном зале, программное обеспечение, позволяющее визуально (на графике и картограмме) контролировать каждую операцию и ей соответствующую реакцию активной зоны. На компьютер ДРФ были выведены сигналы каналов контроля нейтронного потока (АФП и СКП). В компьютер был заложен также и график загрузки ТВС (координаты и последовательность загрузки). Графически на картограмме активной зоны отмечалась ячейка загружаемой ТВС и достигнутая к текущему моменту конфигурация активной зоны. Таким образом, ДРФ имел возможность на экране компьютера оперативно обозначать место загружаемой ТВС, делать прогноз реакции того или другого конкретного канала контроля и через 2-3 минуты видеть подтверждение прогноза по реальным показаниям. Этим, впервые для реакторов российской поставки, устранено расхождение с общепринятой в мире методикой контроля на основе подтверждения прогнозируемой реакции подкритичной активной зоны. Для чего и применяется дополнительный источник нейтронов.

Видимые ненулевые показания после каждой операции позволяют многократно уменьшить время реакции контролирующего физика и оператора на нештатную ситуацию. Раньше отличить ложное срабатывание сигнализации от срабатывания по причине действительного повышения уровня нейтронного потока в первые минуты было невозможно. А медленное действительное нарастание нейтронного потока, не



связанное с загрузкой ТВС, могло оставаться незамеченным в течении часов, а то и десятков часов.

Несколько слов о самом программном обеспечении, разработанном специалистами Нововоронежского филиала ФГУП «Фирма «Атомтехэнерго».

Помимо того, что программное обеспечение «Система контроля нейтронного потока при загрузке» полностью включает в себя возможности BSR-40R (выдача визуальной и звуковой сигнализации при превышении аварийных уставок СКП по частоте и периоду), оно еще выполняет дополнительные функции в режиме реального времени:

- Графическое представления сигналов СКП по 6-ти каналам и АФП по 4-м каналам (с возможностью изменения масштаба представления).
- Сохранения в архив (в файл) полученной информации от СКП и АФП.
- Сохранения в файл моментов срабатывания сигнализации по превышению уставок по частоте и периоду.
- Графическое представление информации по ячейке загружаемой ТВС и загруженным кассетам ТВС в активной зоне (картограмма).
- Ведение журнала загрузки активной зоны.

Таким образом на рабочем месте ДРФ сосредоточен полный комплекс информации, необходимой для надежного контроля нейтронного потока и удовлетворяющей требованиям правил ядерной безопасности.

Данное программное обеспечение имеет интуитивно понятный интерфейс, удобно в использовании и работает в автономном режиме (без участия человека). Вид панели системы контроля перегрузки (на экране компьютера) представлен на рисунке 6.

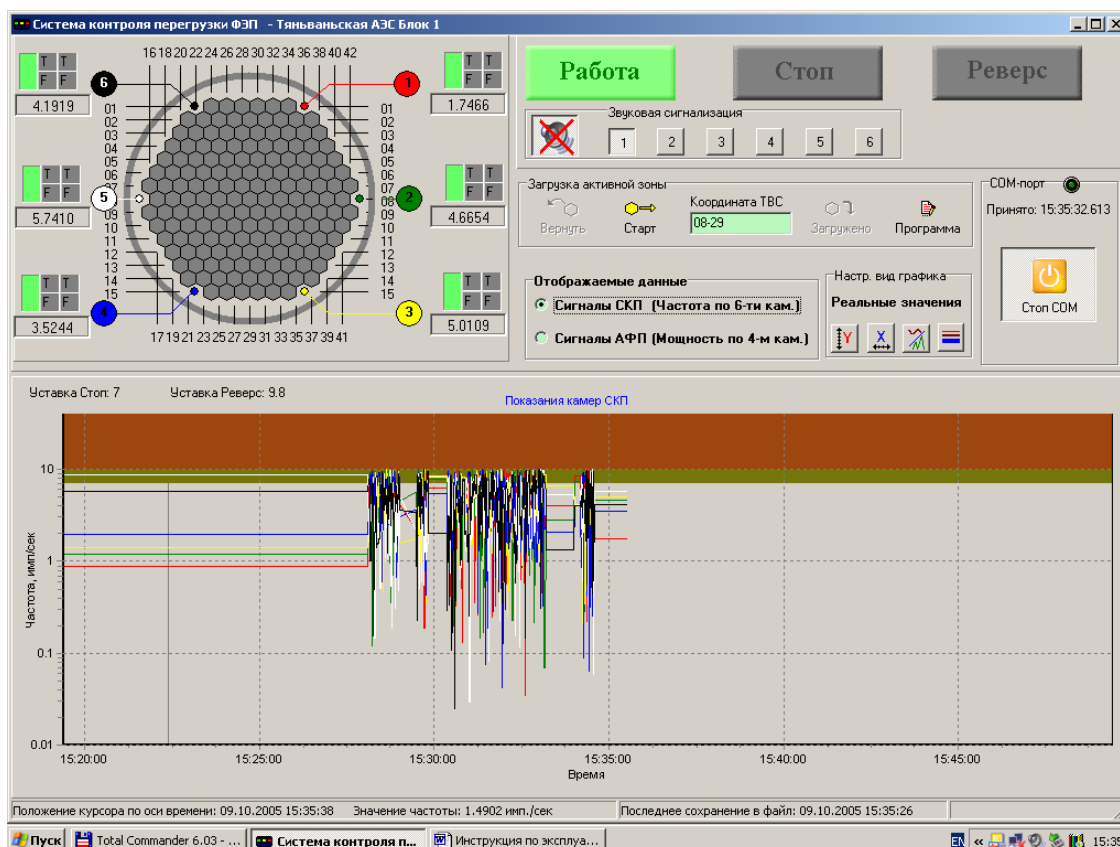


Рис. 6. Вид панели (на экране компьютера) системы контроля нейтронного потока при загрузке

В дальнейшем предполагаются следующие шаги по усовершенствованию системы:

1. При организации передачи сигналов с пульта управления перегрузочной машины в центральный зал - доработать систему, с целью автоматического отражения пошагового выполнения операций с ТВС и изменения информации на картограмме активной зоны. Сейчас информация о начале выполнения операции по загрузке каждой ТВС и о ее завершении вводится вручную кликом мыши компьютера.
2. Установить и подключить компьютер с аналогичным программным обеспечением на рабочее место контролирующего физика в помещении пульта управления перегрузочной машины, что позволит осуществлять контроль перегрузки топлива со всеми преимуществами, описанными выше. Это существенно повысит уровень безопасности при перегрузке.

## 6 ВЫВОДЫ.

1. Применение трех систем контроля позволило осуществить и продемонстрировать китайскому Заказчику возможность надежного контроля нейтронного потока подкритичной активной зоны, как до, так и после заполнения борным раствором. Сразу после заполнения контроль ведется по каналам АФП. После заполнения борным раствором и возвращения показаний каналов АФП на «нулевые» фоновые значения, контроль ведется по каналам СКП. Впервые в практике пусков реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 на протяжении всей загрузки активной зоны свежим топливом операции велись при наличии показаний систем контроля!

Раньше, до 1 блока Ростовской АЭС, загрузка велась при нулевых фоновых показаниях. На 1 блоке Ростовской АЭС удалось достичь показаний выше фоновых на этапе «сухой» загрузки, но после заполнения борным раствором показания возвращались на фоновые значения (см. рисунок 7).

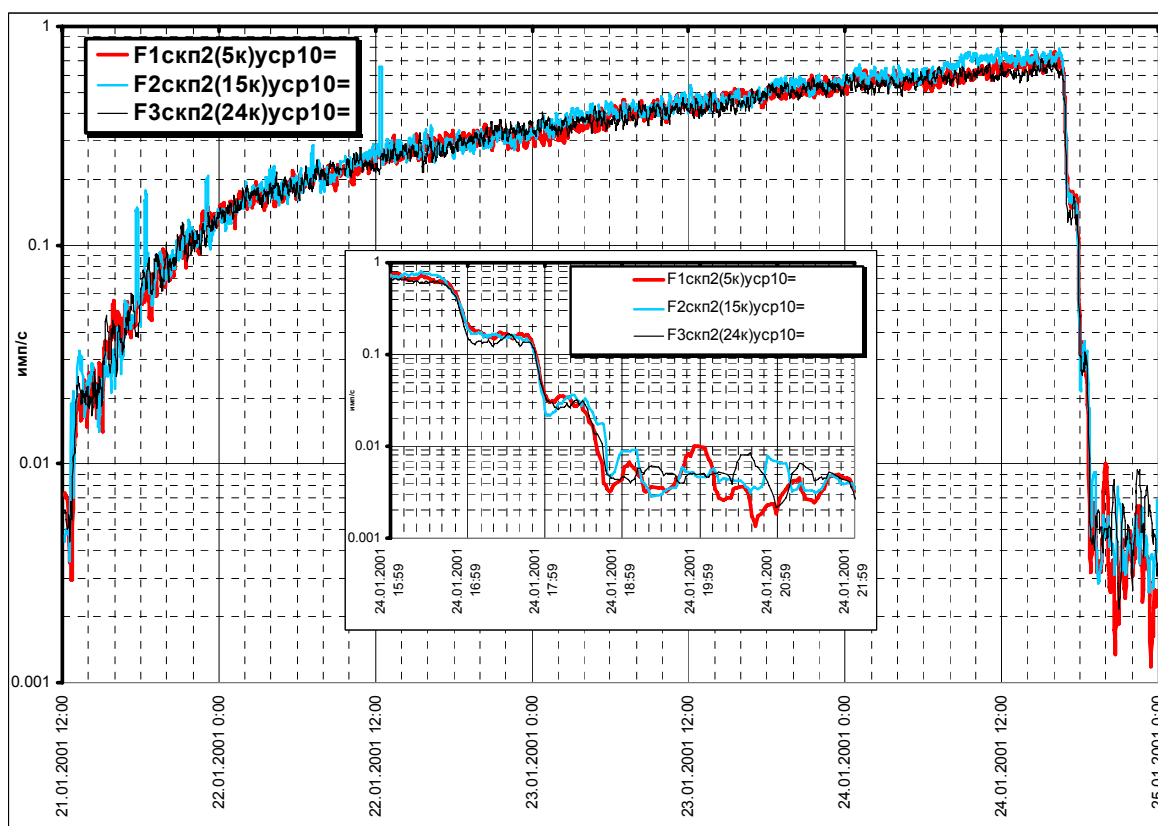


Рис. 7. Показания каналов СКП при загрузке блока №1 Ростовской АЭС.



Возможные причины того, что на Тяньваньской АЭС после заполнения удалось достигнуть показаний выше фона:

- концентрация борной кислоты на 1 г/кг меньше, что должно было снизить поглощение нейтронов;
- уровень завершения заполнения был на 30-40 см меньше, что, по видимому, позволило эффективнее работать верхним счетчикам в сборке;
- применение трубок из циркония вместо стали в каналах ионизационных камер, что также снизило поглощение нейтронов.

На первые две причины следует обратить внимание в будущем, при выполнении загрузок, в том числе при разработке программ и процедур.

2. Осуществление надежного контроля нейтронного потока подкритичной активной зоны показало, что необходимости в применении постороннего источника нет. Более того, контроль загрузки, заполненной борным раствором концентрацией 17 г/кг, активной зоны на блоке №1 Тяньваньской АЭС был более информативен, чем контроль загрузки на блоке №1 АЭС Темелин в Чехии, осуществлявшийся по американской методике с применением «внешнего» источника нейтронов в активной зоне. Там, в заполненной с самого начала активной зоне с циркулирующим борным раствором концентрацией 12 г/кг, показания системы контроля нейтронного потока не изменялись (кроме единичных случаев установки ТВС непосредственно вблизи источника). См. рисунок 8.

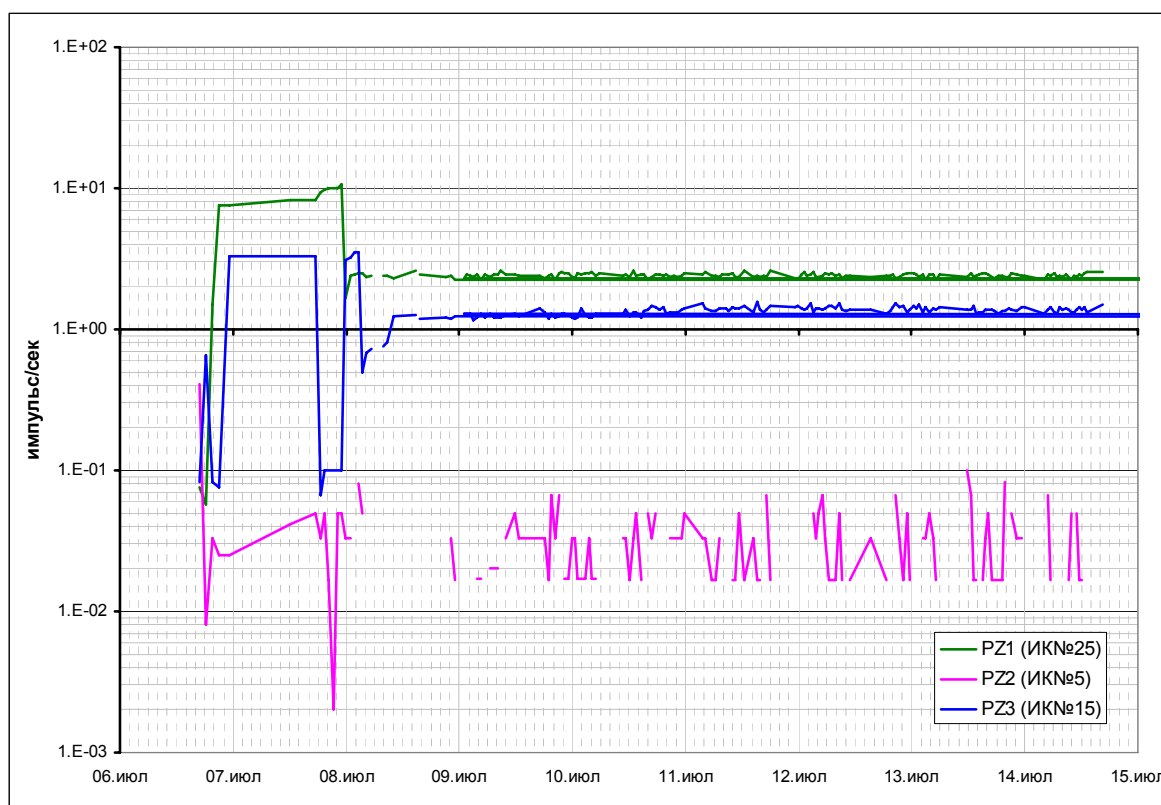


Рис. 8. Показания каналов диапазона источника PZ при загрузке активной зоны блока №1 АЭС Темелин, Чехия.

Первыми шагами графика загрузки на периферии активной зоны устанавливались 2 ТВС, снабженные источниками нейтронов. Затем производилась загрузка ТВС вокруг источников и проверялся отклик показаний близлежащих блоков детектирования. Далее активная зона заполнялась «от двух центров», но показания не

менялись. Показания третьего блока детектирования были с самого начала на уровне фона из-за того, что возле него не было источника.

## **6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ.**

В заключение хотим выразить благодарность:

**Игорю Викторовичу Соколову**, директору по новым технологиям СНИИП-СИСТЕМАТОМ - за сотрудничество и за достигнутые его аппаратурой высокие результаты;

**Александру Юрьевичу Наседкину**, заместителю руководителя лаборатории экспериментальных исследований РНЦ «Курчатовский институт» - за ценные советы и помощь при заполнении активной зоны реактора борным раствором;

**Валерию Ивановичу Чмыхуну**, специалисту РНЦ «Курчатовский институт» - за идею использования каналов связи нештатных ионизационных камер для передачи сигналов каналов АФП и СКП с БЩУ в центральный зал и за реализацию этой идеи.

**Юрию Валерьевичу Сухареву**, ведущему инженеру Нововоронежского филиала ФГУП «Фирма «Атомтехэнерго» – за предоставление данных по АЭС Темелин.