

## Управление ресурсом оборудования и трубопроводов реакторной установки ВВЭР-1000 АЭС, находящихся в эксплуатации

Международная конференция Болгарского  
атомного форума «Болгарская атомная  
энергетика – национальная, региональная  
и мировая энергетическая безопасность»  
г. Варна, 6-8 июня 2018

Богачев Анатолий Викторович,  
д.т.н., Заместитель начальника  
отдела

 ОКБ «ГИДРОПРЕСС»



атомэнергомаш  
ГРУППА КОМПАНИЙ РОСАТОМА

## Ресурсные характеристики определяются методами и средствами разрушающего и неразрушающего контроля:

- сдвиг критической температуры хрупкости вследствие радиационного охрупчивания, температурного и деформационного старения;
- физико-механических свойств материалов;
- механические повреждения (смятие, деформация, истирание и т.д.);
- коррозионное повреждение теплообменных труб;
- недопустимое изменение геометрических размеров;
- дефекты на внутренних поверхностях, недоступных визуальному контролю

## Механизмы повреждения, контролируемые с использованием мониторинга нагружения:

- накопление пластических деформаций;
- малоцикловая усталость;
- изменение структуры материала (образование и рост несплошностей);
- многоцикловая усталость;
- механизм замедленного деформационного коррозионного растрескивания (ЗДКР)

## Требования РД ЭО 1.1.1.05.0330-2012 по напряжениям

- накопление пластических деформаций - расчет проводится при нарушении условий статической прочности по категориям напряжений  $(\sigma)_{RK}$  и  $(\sigma)_{RV}$ . Размах приведенных напряжений  $(\sigma)_{RK}$  и  $(\sigma)_{RV}$  определяется по составляющим общих и местных мембранных, общих и местных изгибных и общих температурных напряжений.
- малоцикловая усталость - ресурсной характеристикой является величина накопленного усталостного повреждения рассчитываемая по местным приведенным напряжениям  $(\sigma_L)$ , которые определяются по составляющим общих и местных мембранных, общих и местных изгибных и общих и местных температурных напряжений с учетом концентрации напряжений.

- изменение структуры материала (несплошность) - ресурсной характеристикой являются размеры несплошности в процессе усталостного роста. Расчет усталостного роста дефектов проводится по эквивалентным напряжениям приведенных к равномерным, которые рассчитываются по профилю изменения местных напряжений ( $\sigma_L$ ) нормальных к сечению дефекта.
- ресурсной характеристикой накопление усталостного повреждения с учетом вибронапряжений, где на малоцикловое (низкочастотное) нагружение накладывается высокочастотное нагружение:  $f_0$  – частота и  $(\sigma_A)$  - низкочастотное напряжение,  $f$  – частота и  $\sigma_A$  - высокочастотное напряжение.

$$\sigma_L = G + A_1 \cdot p_1 + A_2 \cdot p_2 + \sum_{i=1}^I B_i \cdot T_i^{cp} + \sum_{j=1}^J S_j \cdot u_j + \sum_{n=1}^N D_n \cdot M_n^{cp} +$$

$$+ \sum_{k=1}^K \left[ C_k \cdot T_k + \int_{t-\Delta t}^t \sigma_k(t-\tau) \cdot \frac{\partial T_k(\tau)}{\partial \tau} \cdot d\tau \right]$$

где  $G, A_1, A_2, B_i, S_j, D_n, C_k$ , - определяющие коэффициенты, т.е. некий набор констант, индивидуальный для каждой контрольной точки;  $p_1, p_2$  - давление 1 и 2 контуров;  $u_j(t)$  - компоненты вектора перемещений;  $T_i^{cp}, M_n^{cp}(t)$  - интегральные температуры и температурные моменты;  $T_k(\tau)$  - температуры теплоносителя, омывающего поверхности узла;  $\sigma_k(t)$  - базовая функция интеграла Дюамеля;  $t$  и  $\Delta t$  - текущее время и характерное время выхода напряжений на стационарный режим;  $I, J, N, K$  - количество нагружающих факторов каждого типа.

## В соответствии с формулой ( $\sigma_L$ ) необходимо учитывать воздействия на ТМО:

1. Температурные нагрузки, вызванные изменениями температуры теплоносителя  $T_i^{cp}$ ,  $M_n^{cp}(t)$  - интегральные температуры и температурные моменты;  $T_k(\tau)$  – температуры теплоносителя, омывающего поверхности узла;
2. Нагрузки от реального перемещения при существующем состоянии опорно-подвесной системы:  $u_j(t)$  – компоненты вектора перемещений;
3. Вибрационные нагрузки:  $f$  – частота и  $A$ -амплитуда вибрации по результатам спектрального анализа;
4. Внешние и внутренние воздействия (гидроудары, ударные нагрузки):  $f$  – частота и  $A$ -амплитуда

Все энергоблоки ВВЭР-1000 отличаются друг от друга наличием систем диагностики, количеством различных датчиков, возможностями АСУ ТП и, поэтому даже для энергоблоков одного проекта (например В-320) вопрос применения имеющихся систем диагностики к задачам ПУР и необходимости дооснащения системами диагностики должен решаться индивидуально в процессе разработки ПУР для конкретного энергоблока.

В связи с этим изложенный в докладе подход к необходимому оснащению системами диагностики тепломеханического оборудования (ТМО) энергоблоков АЭС ВВЭР-1000 проекта В-320 является предварительным и направлен только на выполнение требований НП-096-15.

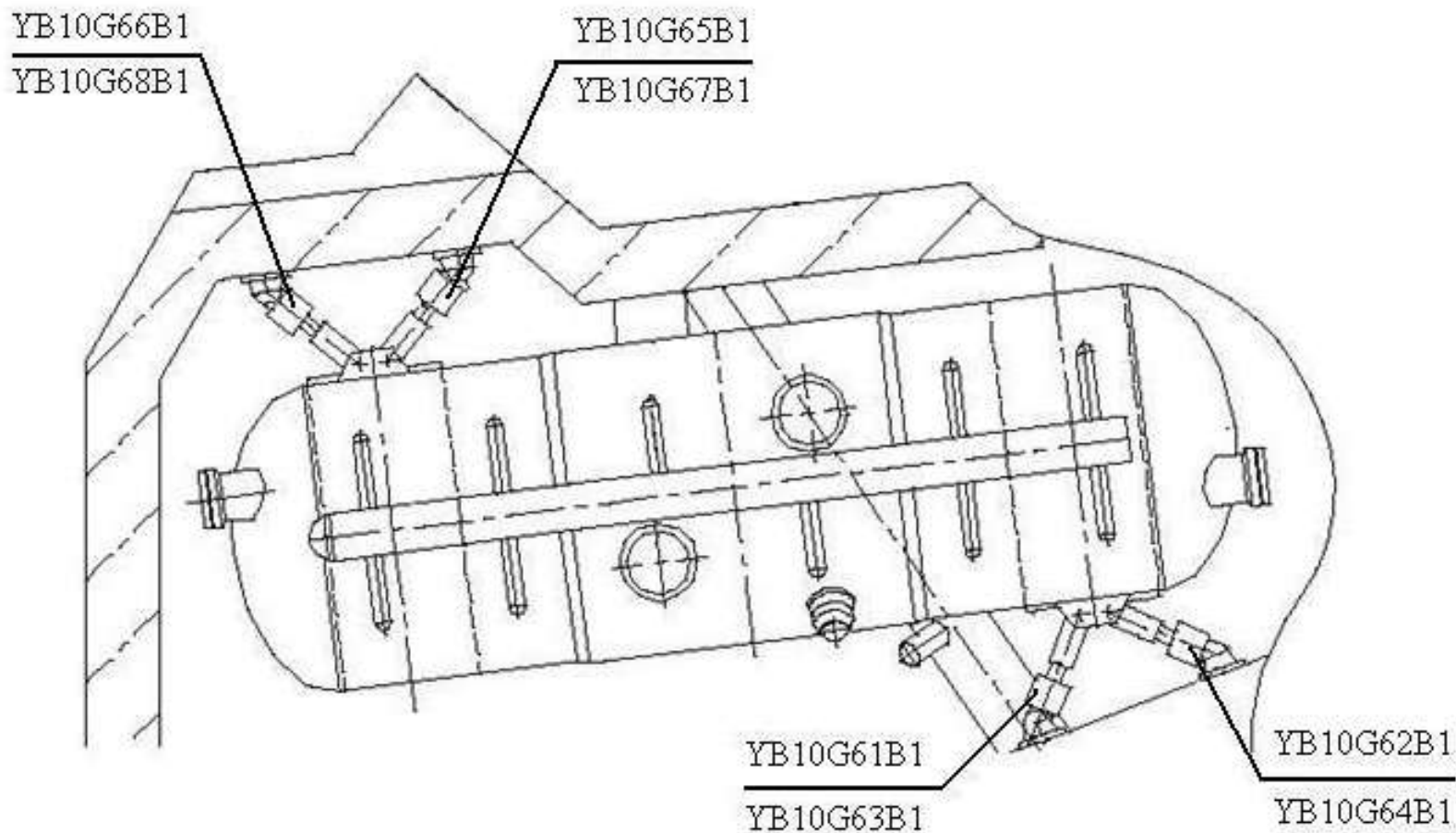


## Для управления ресурсом ТМО необходимы следующие системы диагностики :

- система контроля гидроамортизаторов (СКГА);
- система контроля вибрации (СКВ);
- система обнаружения свободных предметов (СОСП);
- система контроля разъемных соединений (СКРС);
- система автоматизированного контроля остаточного ресурса (САКОР);
- система обеспечения базами данных для управления ресурсом (СОБД);
- системы контроля течей САКТ и СКТВ

## Функции СКГА:

- проверять достоверность показаний датчиков перемещения на ПГ по каждому ряду ГА путем непрерывного («on-line») расчет перемещения горячих и холодных патрубков ГЦТ на ПГ путем сравнения между собой;
- проверять правильность расчета положения корпусов парогенераторов по избыточным датчикам для расчета, включая показания ДОП;
- рассчитывать нагрузки на патрубки оборудования и трубопроводов РУ от вспомогательных систем, в том с учетом показаний датчиков СКТП;
- отображать на видеокадрах реальное перемещение ГЦК



Размещение гидроамортизаторов на корпусе ПГ и места их крепления для мониторинга нагрузок от реальных перемещений

## Дополнительные нагружающие факторы:

- перемещение горячего патрубка ГЦТ на ПГ поперек оси ГЦТ;
- перемещение горячего патрубка ГЦТ на ПГ вдоль оси ГЦТ;
- поворот ПГ вокруг вертикальной оси;
- перемещение ГЦНА поперек оси ГЦТ;
- перемещение ГЦНА вдоль оси ГЦТ;
- перемещение холодной нитки вдоль оси ГЦТ;
- перемещение холодного патрубка ГЦТ на ПГ поперек оси ГЦТ;

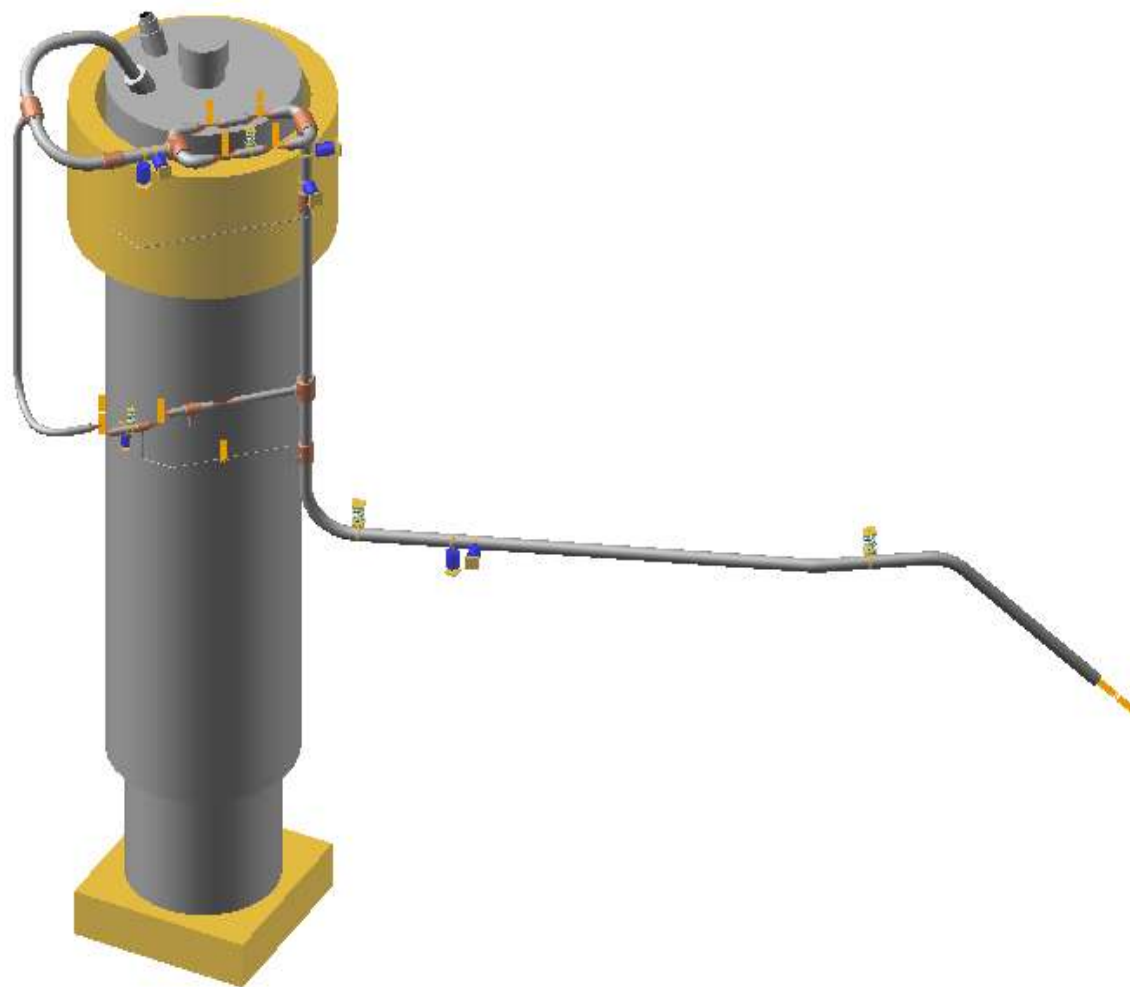
## Требования к СКГА :

- обеспечить удобство персоналу в обслуживании установленных ДЛП, ТСП;
- иметь узлы крепления датчиков, защищающие датчики от внешних воздействий;
- иметь современные средства измерения, минимизирующие вероятность их отказа;
- качественно и достоверно «on-line» контролировать проектную работу ГА;
- обеспечить прием информации от дополнительных ТС (при необходимости);
- передавать в САКОР только достоверную информацию для решения задач управления ресурсом.

## Требования к СКВ:

- объектом контроля вибрации должны быть трубопроводы, примыкающие к ГЦТ (до первой отсечной арматуры) и трубопроводы впрыска в КД;
- акселерометры - 12 штук на ГЦТ (по одному на каждом участке реактор-ПГ-ГЦН-реактор) и 2 на трубопроводе впрыска возле врезок байпасов и тонкого впрыска;
- по 2 датчика относительного перемещения (ДОП) на ГЦНА;
- ПО СКВ должно выполнять функции спектрального анализа для расчета амплитуд и частот вибрации трубопроводов и их передачу в СОБД для расчета накопления усталостного повреждения с учетом вибрации трубопроводов.

## Трубопроводы впрыска, наиболее подверженные повреждению от вибрации



## Зоны расчета вибрации

Зоны возможного влияния вибрации	Допустимые амплитуды
Врезка подпитки в холодную нитку ГЦТ 1-4 (с.с. с патрубком)	По результатам расчета вынужденных колебаний
Врезки планового и аварийного расхолаживания в горячую и холодную нитку ГЦТ 1 (с.с. с патрубком)	По результатам расчета вынужденных колебаний
Врезка аварийного ввода бора в холодную нитку ГЦТ 1,3,4 (с.с. с патрубком)	По результатам расчета вынужденных колебаний
Сварное соединение трубопровода впрыска 133x14 мм с тройником 219x20 мм	По результатам расчета вынужденных колебаний
Сварное соединение байпасного трубопровода Ду10 с тройником 219x20 мм	По результатам расчета вынужденных колебаний



## Требования к СОСП:

- для контроля динамических вибрационных нагрузок патрубков присоединенных систем от возможных гидроударов - 4 датчика на патрубках подпитки и 1 датчик на впрыске в КД на трубопроводе возле задвижек толстого впрыска;
- для контроля посторонних предметов - 3 датчика на днище реактора и по 1 датчику на горячих коллекторах ПГ (всего 4).

## Контроль плотности разъемных соединений выполняется с использованием:

- датчиков давления контроля плотности межпрокладочной полости разъемных соединений с выводом на БЩУ - по 2 датчика на разъем (реактор, КД, ПГ);
- влажностных датчиков системы контроля течей с выводом на БЩУ;
- оценкой остаточного ресурса (САКОР) гнезд для шпилек разъемных соединений, включая базу данных по количеству уплотнений.

## Контроль плотности выполняется для следующих разъемных соединений

Наименование параметра	Код параметра
Давление в полости главного разъема, 0-25 МПа	40YCR80CP007(8)_XQ01
Давление в полости разъема люка КД, 0-25 МПа	40YPR10CP001(2)_XQ01
Давление в полости разъема ТЭН КД, 0-25 МПа	40YPR10CP003(4,5,6)_XQ01
Давление в полости разъема коллектора ПГ1-4, 0-25 МПа	40YBR1(2,3,4)0CP001(2)_XQ01
Давление в полости разъема люка Ду 800 ПГ1-4, 0-10 МПа	40YBR1(2,3,4)0CP003(4)_XQ01
Давление в полости разъема люка Ду 500 ПГ1-4, 0-10 МПа	40YBR1(2,3,4)0CP005(6)_XQ01

## Функции САКОР:

- “on-line” диагностика максимальных значений стратификации с выдачей диагностического сообщения;
- “on-line” диагностика непроектных перемещений оборудования и трубопроводов РУ с контролем допустимой величины по критерию нагруженности;
- “on-line” диагностика количества циклов термопульсаций с выдачей диагностического сообщения;
- «on-line» выявление зон повышенной пластической деформация с определением допустимости состояния по категориям напряжений  $(\sigma)_2$  и  $(\sigma)_{RV}$ ,  $(\sigma)_{RK}$ , включая зоны карманов коллекторов ПГ 1-4.

## **САКОР осуществляет расчет следующих ресурсных характеристик:**

- накопление пластической деформации;
- накопление усталостного повреждения, в том числе с учетом влияния среды, концентрации напряжений;
- усталостный рост дефектов.

## **ВК САКОР должен передавать в СОБД информацию для ее дальнейшего использования в управлении старением:**

- по нагрузкам от перемещения ГЦК;
- по стратификации и термопульсациям теплоносителя;
- по накоплению усталостного повреждения;
- по усталостному росту дефектов;
- по квазистатическим напряжениям в зонах вибрации.

## ПО СОБД содержит следующие результаты:

- контроль ресурсных характеристик разъемных соединений;
- расчет вибронапряжений от измеренной вибрации трубопроводов;
- расчет вибронапряжений от динамической нагруженности; вызванной возможными гидроударами;
- расчет накопления усталостного повреждения с учетом вибрации трубопроводов;
- оценка ресурсных характеристик по критерию накопления усталостного повреждения;
- оценка ресурсных характеристик по росту дефектов до предельных состояний по критериям локальной пластической неустойчивости, хрупкой и вязкой прочности для трубопроводов;
- проверка выполнения критериев ТПР в процессе эксплуатации;
- расчет вероятности разрушения по каждому сегменту трубопроводов РУ;
- оценка уровня безопасности АЭС (риск-мониторинг) с учетом расчета вероятности разрушения трубопроводов РУ

## ПО СОБД ведет обновляемые базы данных:

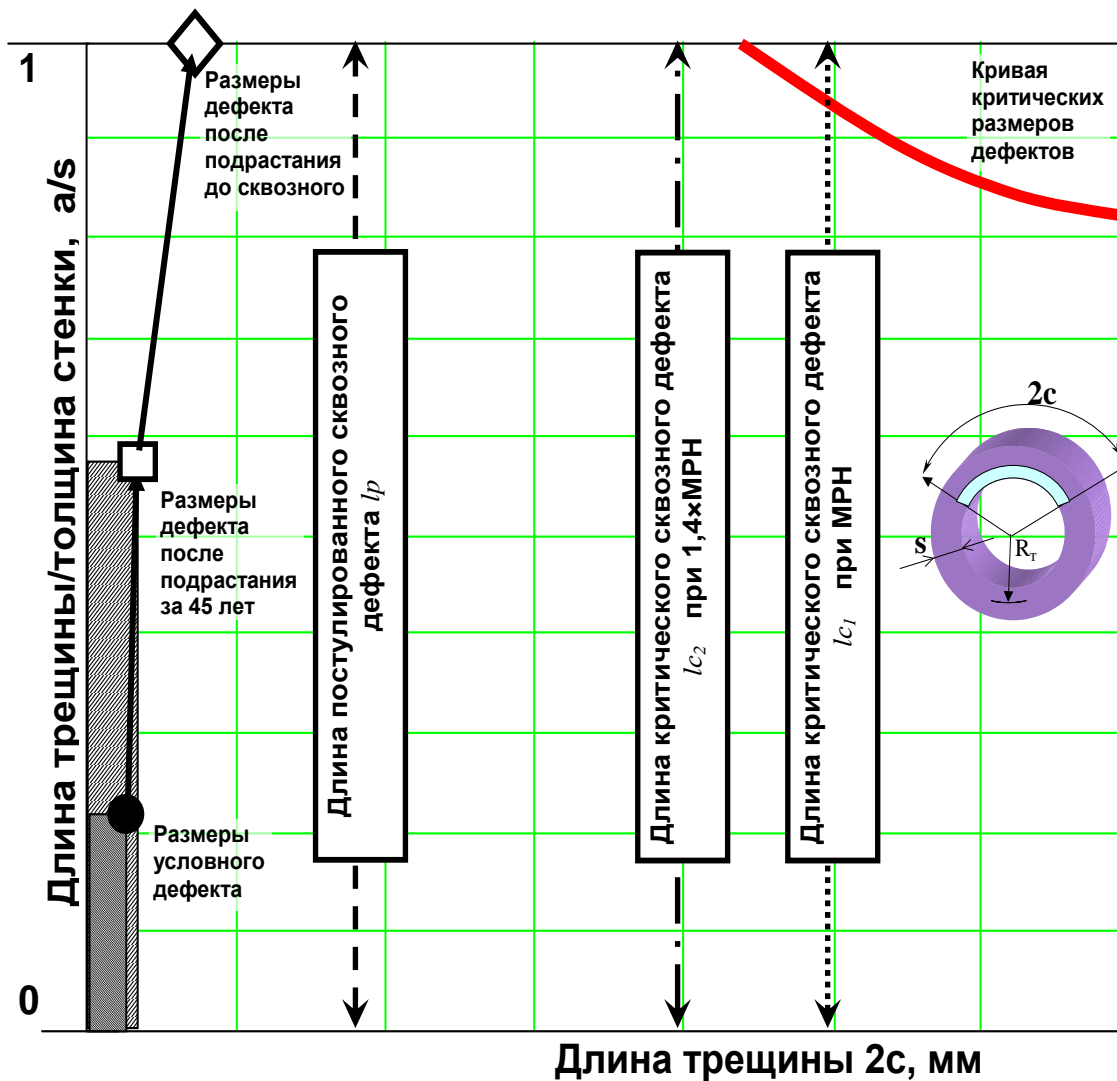
- максимальные значения стратификации;
- максимальные значения параметров по перемещениям, влияющих на нагрузки;
- максимальные значения термоударов по всем трубопроводам и патрубкам;
- данные по схематизации дефектов с учетом их роста по расчету;
- данные по физико-механическим свойствам материалов;
- данные по накопленному усталостному повреждению с учетом влияния среды и вибрации;
- данные по количеству срабатываний арматуры и насосов и оценки их надежности.

## ПО СОБД обеспечено не обновляемыми базами данных в процессе эксплуатации:

- проектные значения термоударов из теплогидравлических расчетов и расчетов на прочность;
- напряжения в трубопроводах в режиме максимального расчетного землетрясения (МРЗ);
- данные по свойствам материалов для расчетов хрупкой прочности;
- данные по водно-химическому режиму (ВХР).



## Результаты расчета по критериям ТПР



**БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!**