

**Исследование свойств графита,
оценка технического состояния и
прогнозирование остаточного ресурса
конструкционных элементов
РУ РБМК, выполненных из графита**

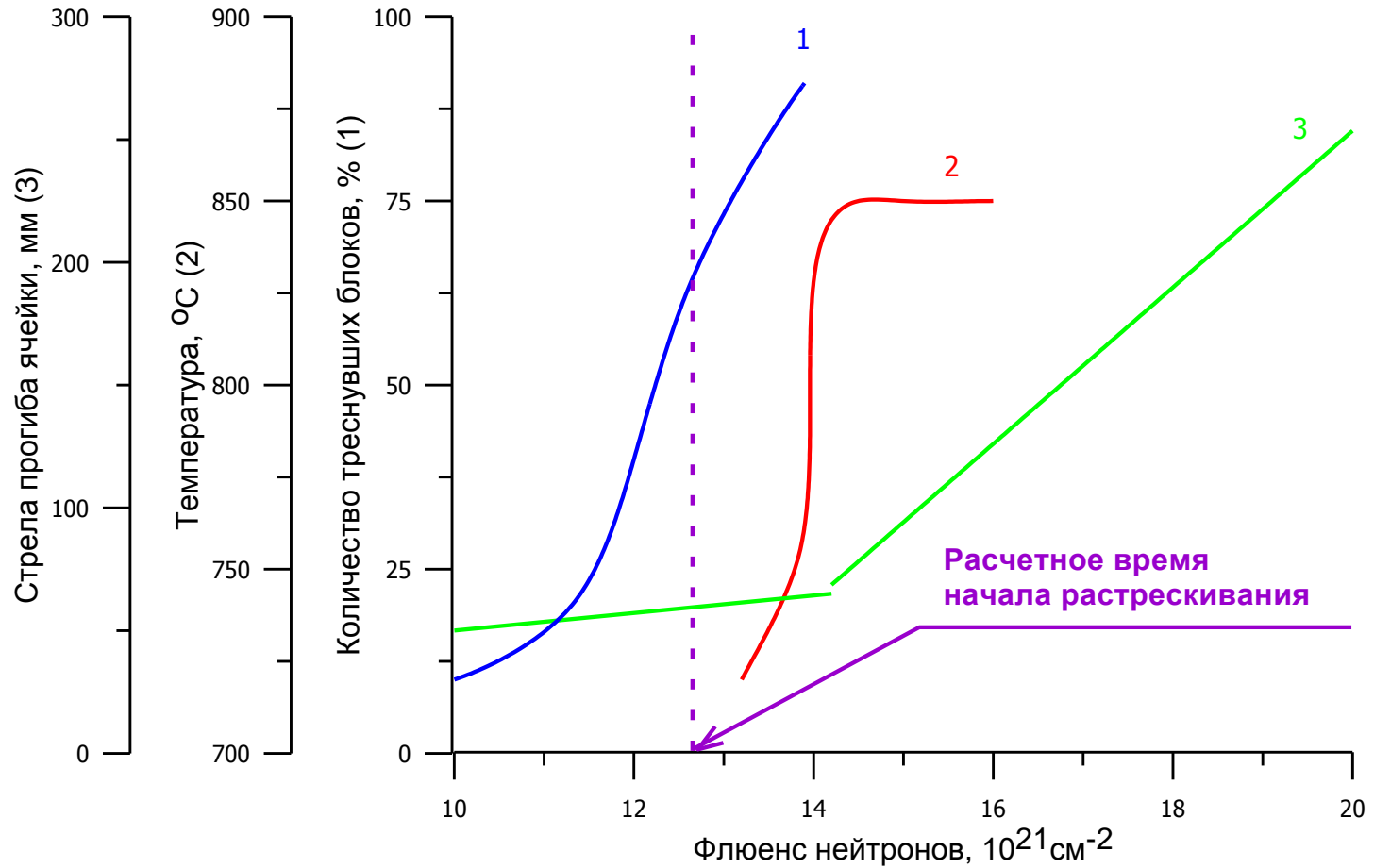
Я.И. Штромбах, О.К.Чугунов



История эксплуатации промышленных реакторов



Деградация кладки реактора АВ-3

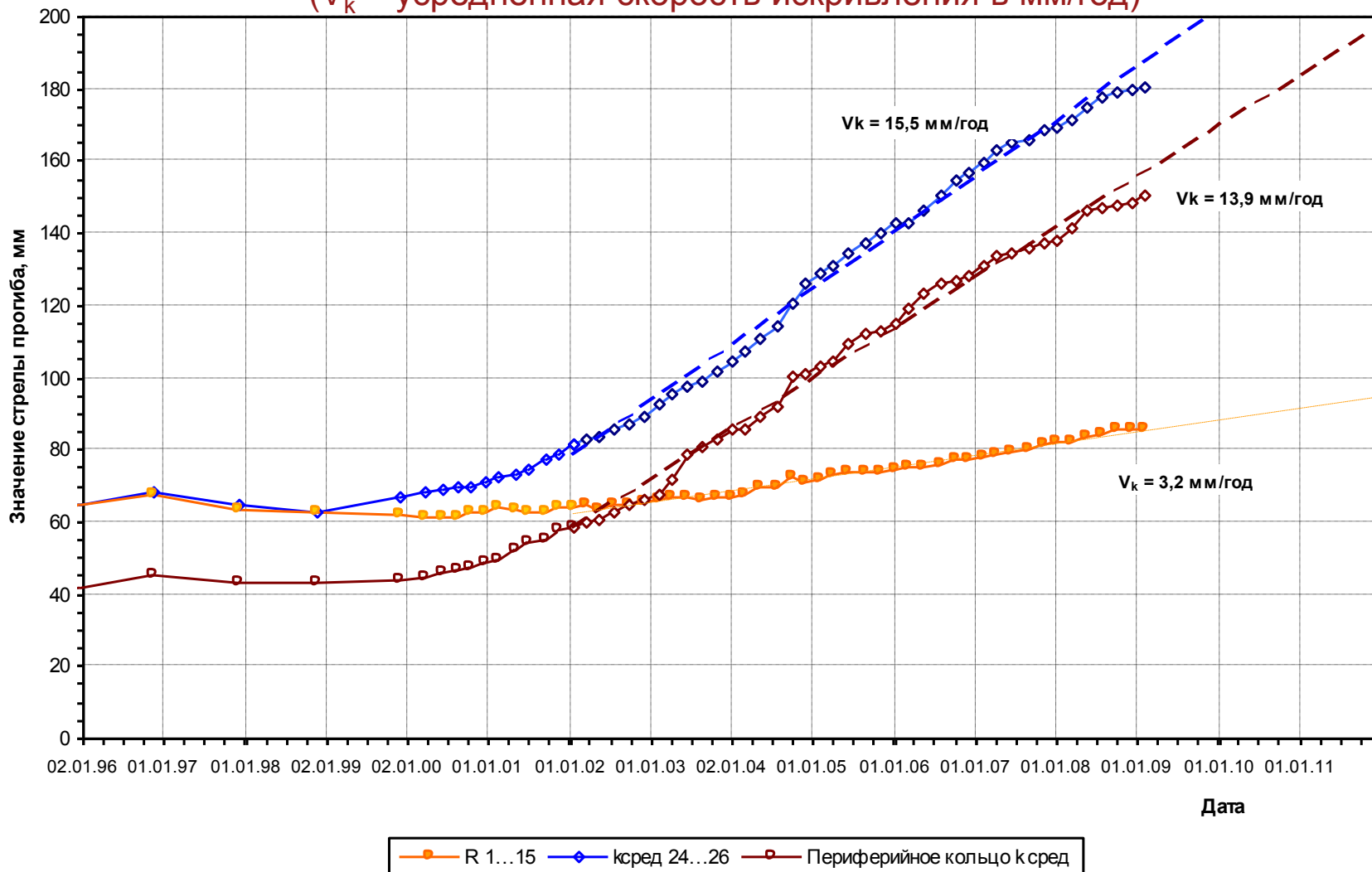


- 1 – Кривая накопления количества треснувших блоков
- 2 – Кривая изменения температуры графита кладки
- 3 – Темп искривления графитовых колонн (увеличение стрелы прогиба периферийных ячеек)



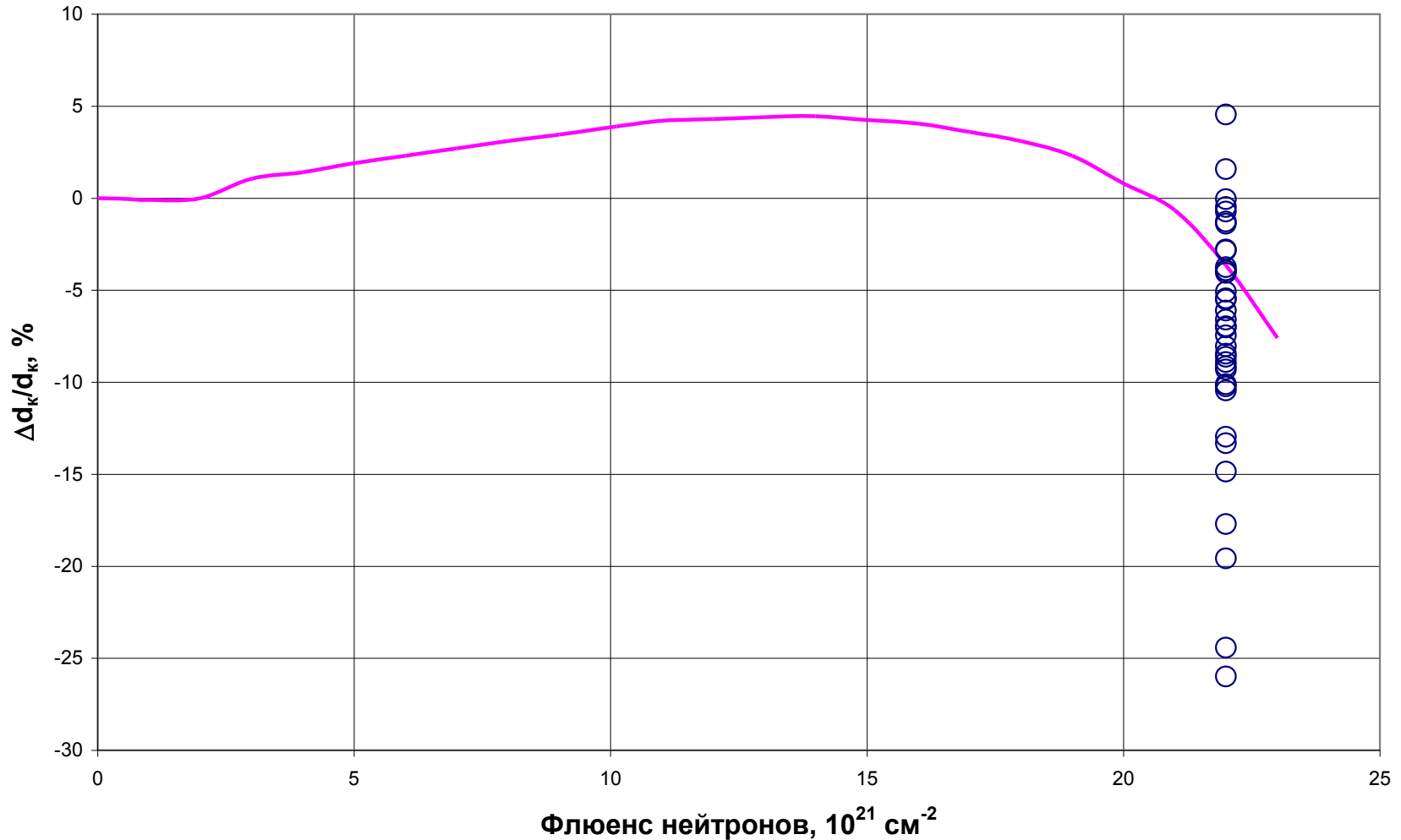
Средние значения стрелы прогиба графитовых колонн для ячеек характерных групп графитовой кладки реактора АДЭ-2

(V_k – усреднённая скорость искривления в мм/год)



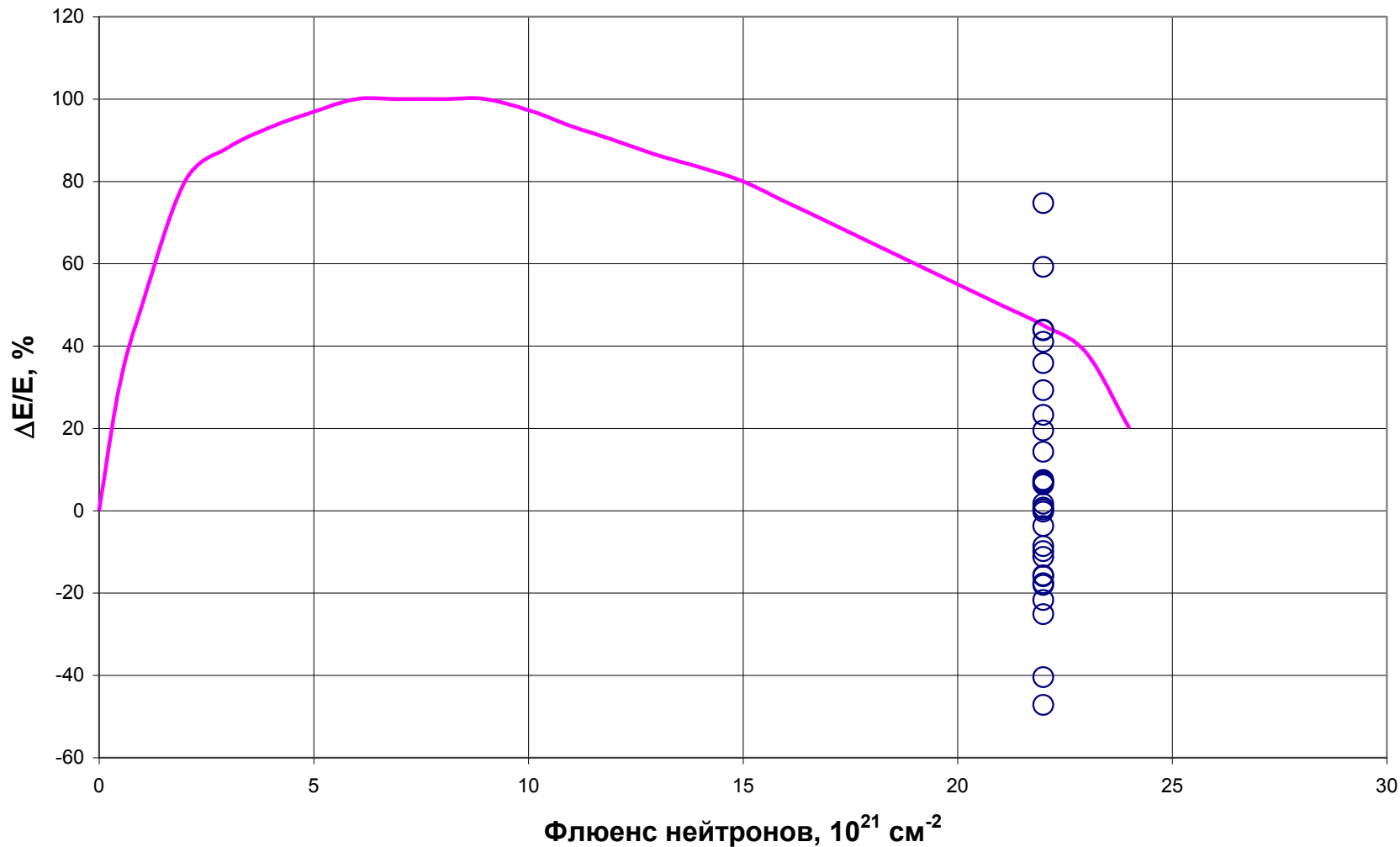
Относительное изменение плотности графита кернов, взятых из кладки реактора АДЭ-2 в 2004 г.

Сплошная линия – изменение плотности графита ГР-280 при аналогичных условиях облучения



Относительное изменение величины модуля упругости графита кернов, взятых из кладки реактора АДЭ-2 в 2004 г.,

Сплошная линия – изменение модуля упругости графита ГР-280 при аналогичных условиях облучения



Результат

На промышленных реакторах была показана возможность безопасной эксплуатации кладок при сохранении графитовыми блоками их несущей способности даже в случае появления в них продольных сквозных трещин и искривления колонн.



Эксплуатация графитовых кладок реакторов РБМК в рамках проектного срока эксплуатации



Критерии работы графитовых кладок реакторов РБМК

- Отсутствие силового взаимодействия между трубой технологического канала и графитовым блоком – исчерпания газового зазора (ГЗ);
- Целостность графитовых блоков – **отсутствие сквозных продольных трещин;**
- Вертикальная усадка колонн – **обеспечение работоспособности узла телескопического соединения (ТСТ).**

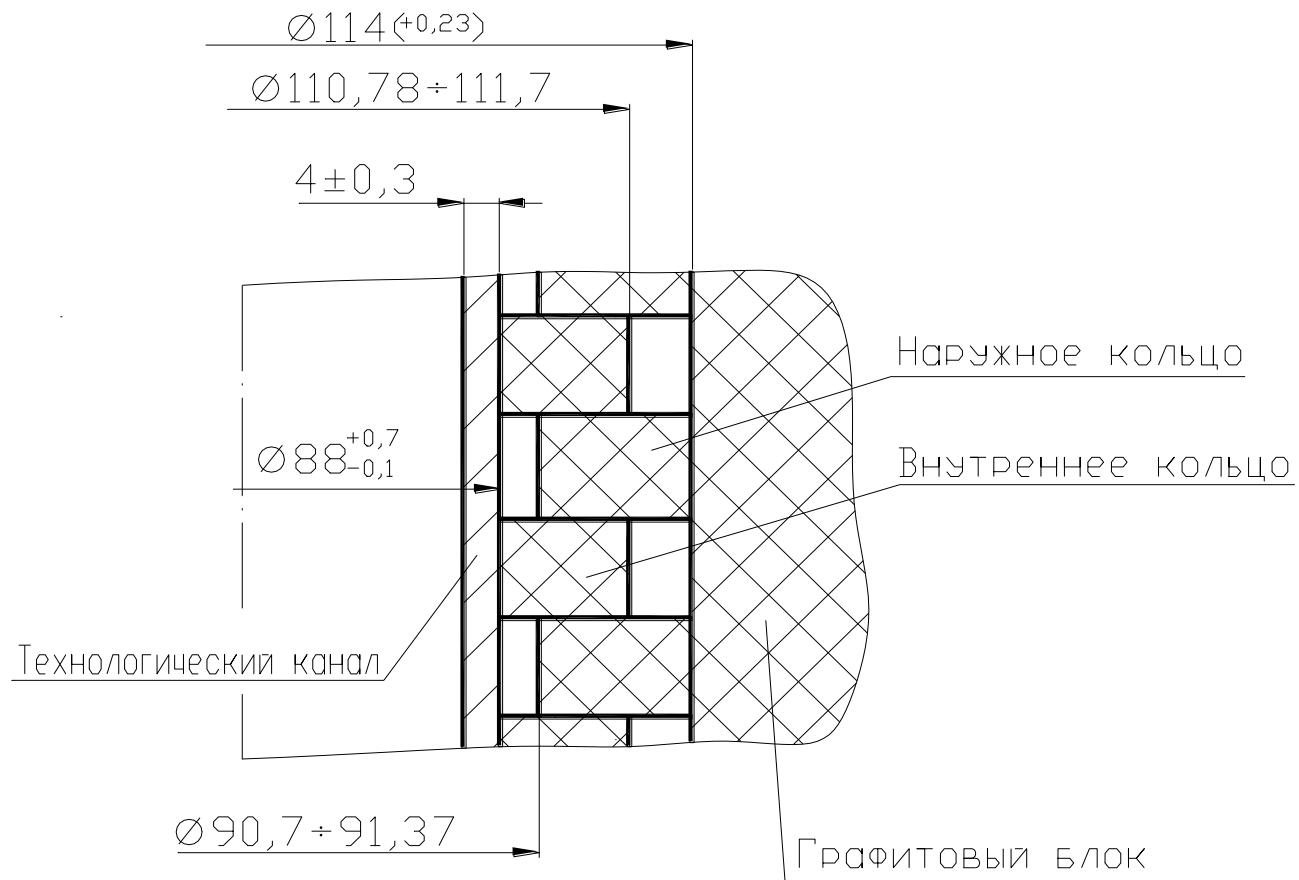


Нормы расчета на прочность типовых узлов и деталей из графита

В 1990 году завершена работа по созданию третьей редакции Норм расчёта на прочность типовых узлов и деталей из графита уран-графитовых канальных реакторов (НГР-01-90) разработчиками которых стали НИКИЭТ, РНЦ «Курчатовский институт» и НИИГРАФИТ.



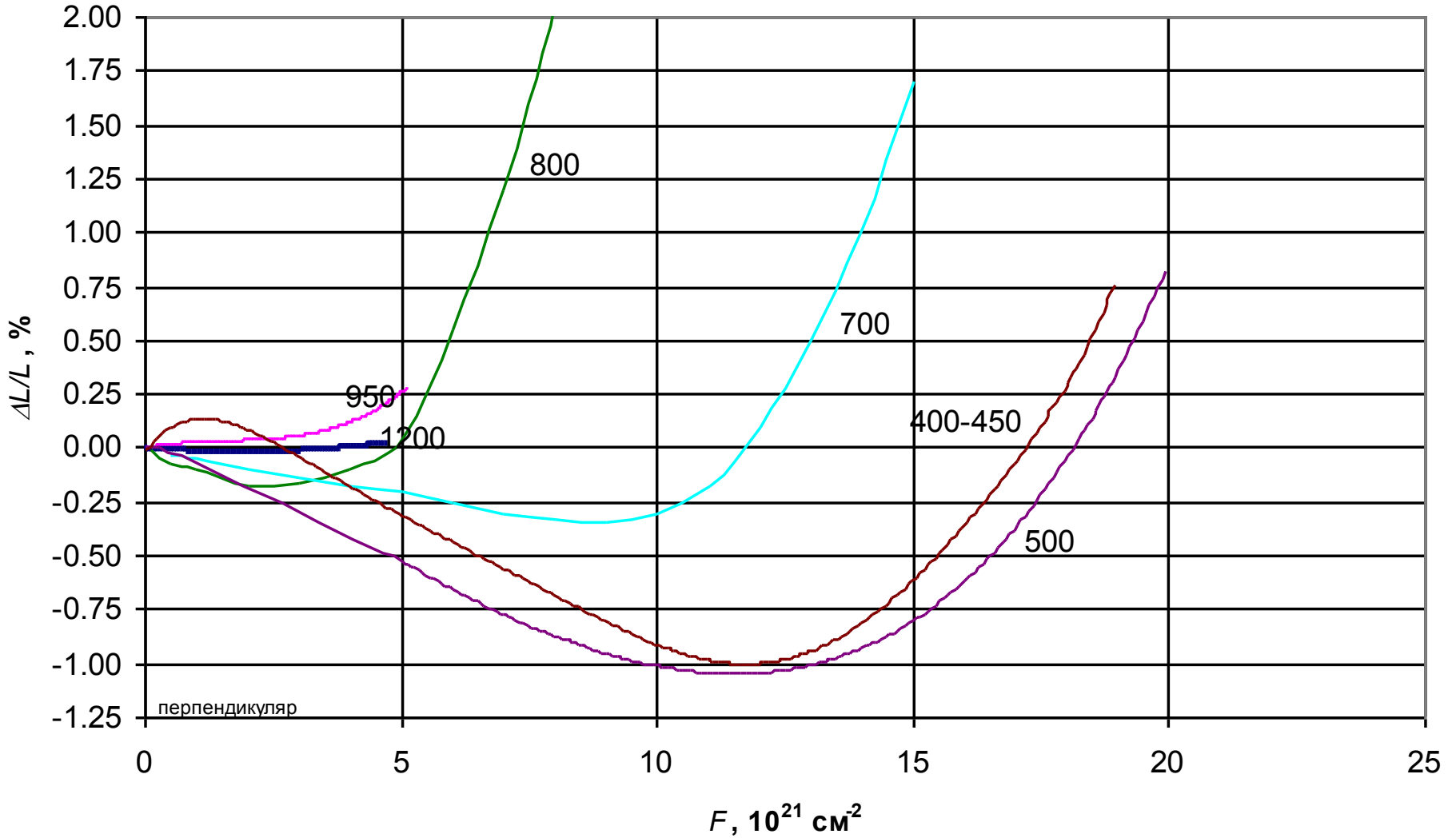
Фрагмент системы «ТК-кладка»



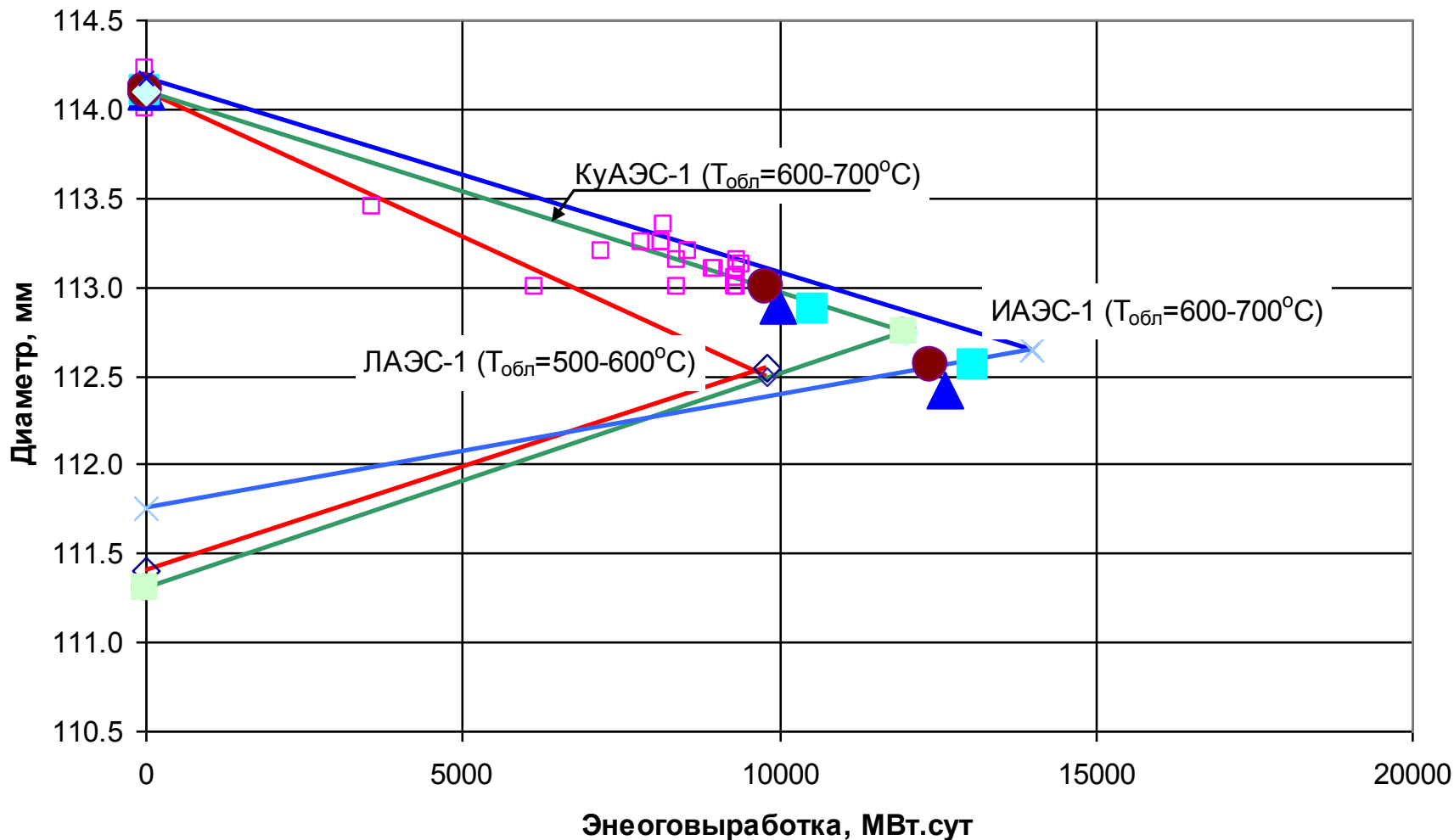
Критерий исчерпания газового зазора (ГЗ)



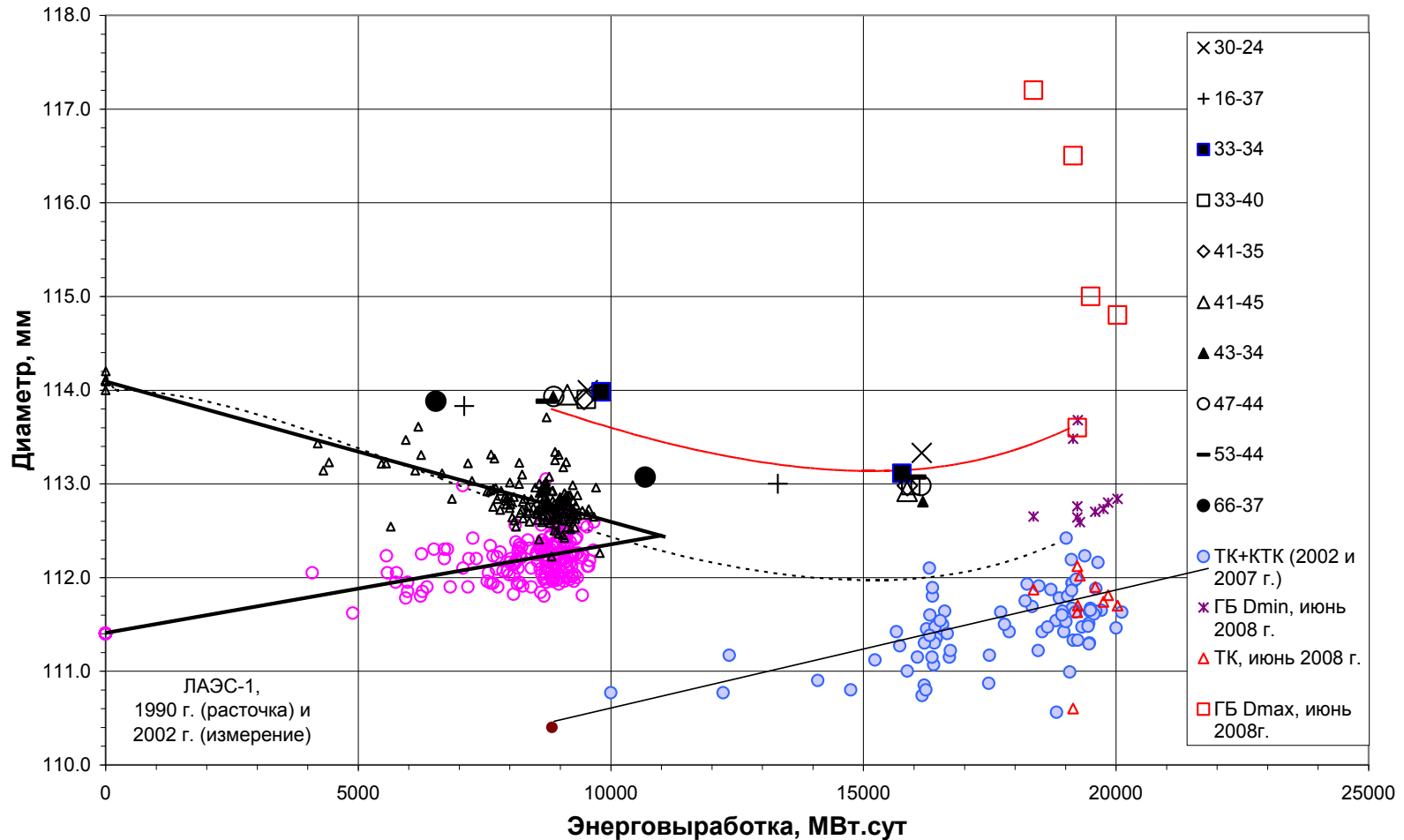
Радиационное формоизменение графита



Скорость усадки графитовых блоков и изменения величины газового зазора для различных АЭС



Зависимость изменения газового зазора в процессе работы реактора (увеличения энерговыработки на ячейку) с учетом изменения диаметра отверстия ГБ при образовании в нем сквозной продольной трещины



Выводы и результаты

Исследование кинетики исчерпания газового зазора показало, что он может быть исчерпан до назначенного срока эксплуатации реактора (30 лет).

Это явилось основанием для проведения ремонта графитовой кладки с расточкой отверстий графитовых блоков и заменой технологических каналов.



Эксплуатация графитовых кладок реакторов РБМК в рамках продлённого срока эксплуатации (ПСЭ)

Осуществляется в соответствии с утверждённой в 2005 году Концерном «Росэнергоатом» Методикой оценки остаточного ресурса графитовой кладки реактора РБМК-1000 (РД ЭО 362-0265), разработанной НИКИЭТ и НИЦ «Курчатовский институт».



Критерии оценки работоспособности графитовой кладки реакторов РБМК-1000

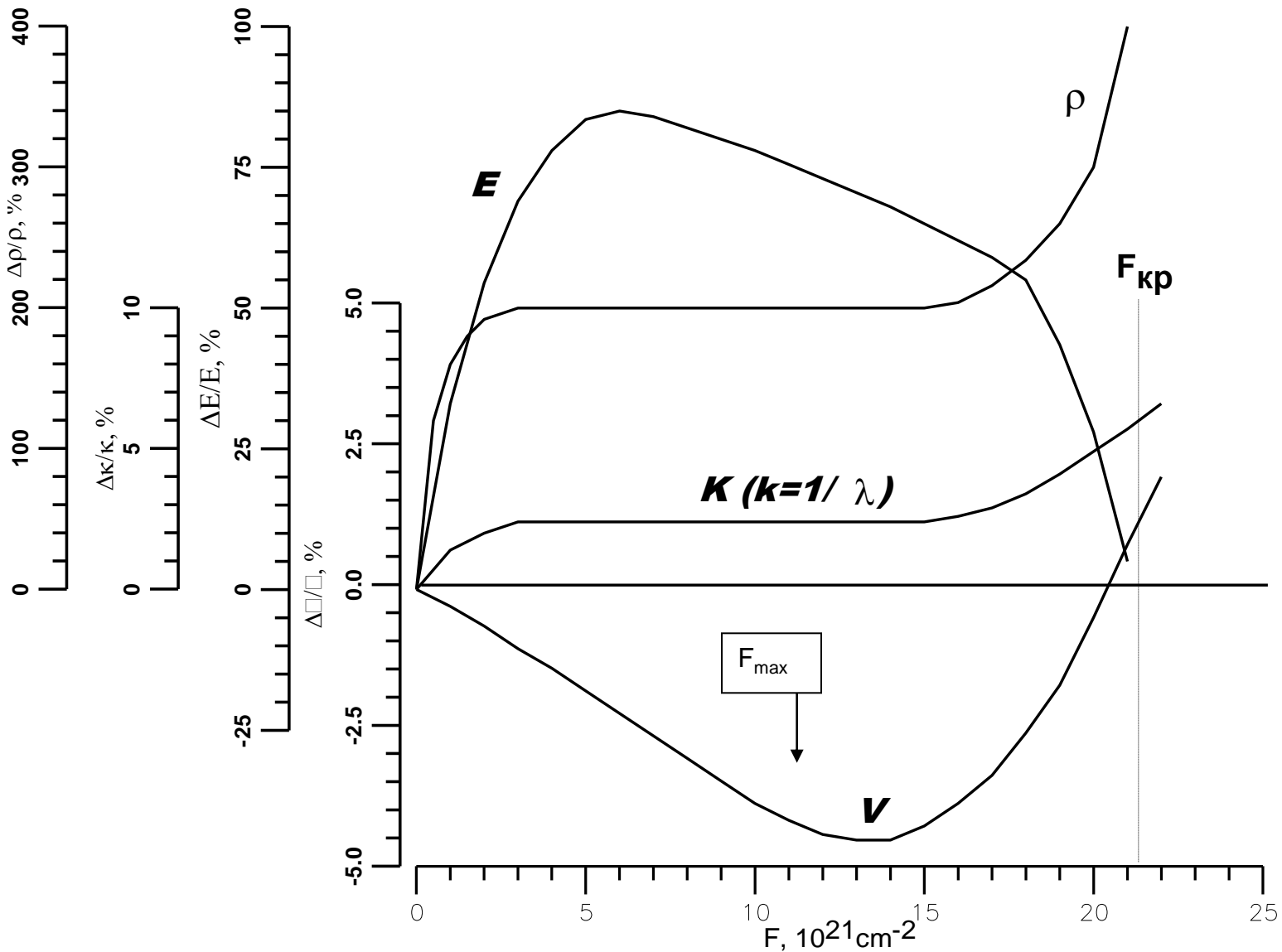
- Деградация графита как конструкционного материала ($F_n < F_{кр}$ - не превышение флюенса повреждающих нейтронов величины критического флюенса) – **сохранение прочностных свойств графита.**
- Растрескивание графитовых блоков и изгиб графитовых колонн - **предельная стрела прогиба колонн**



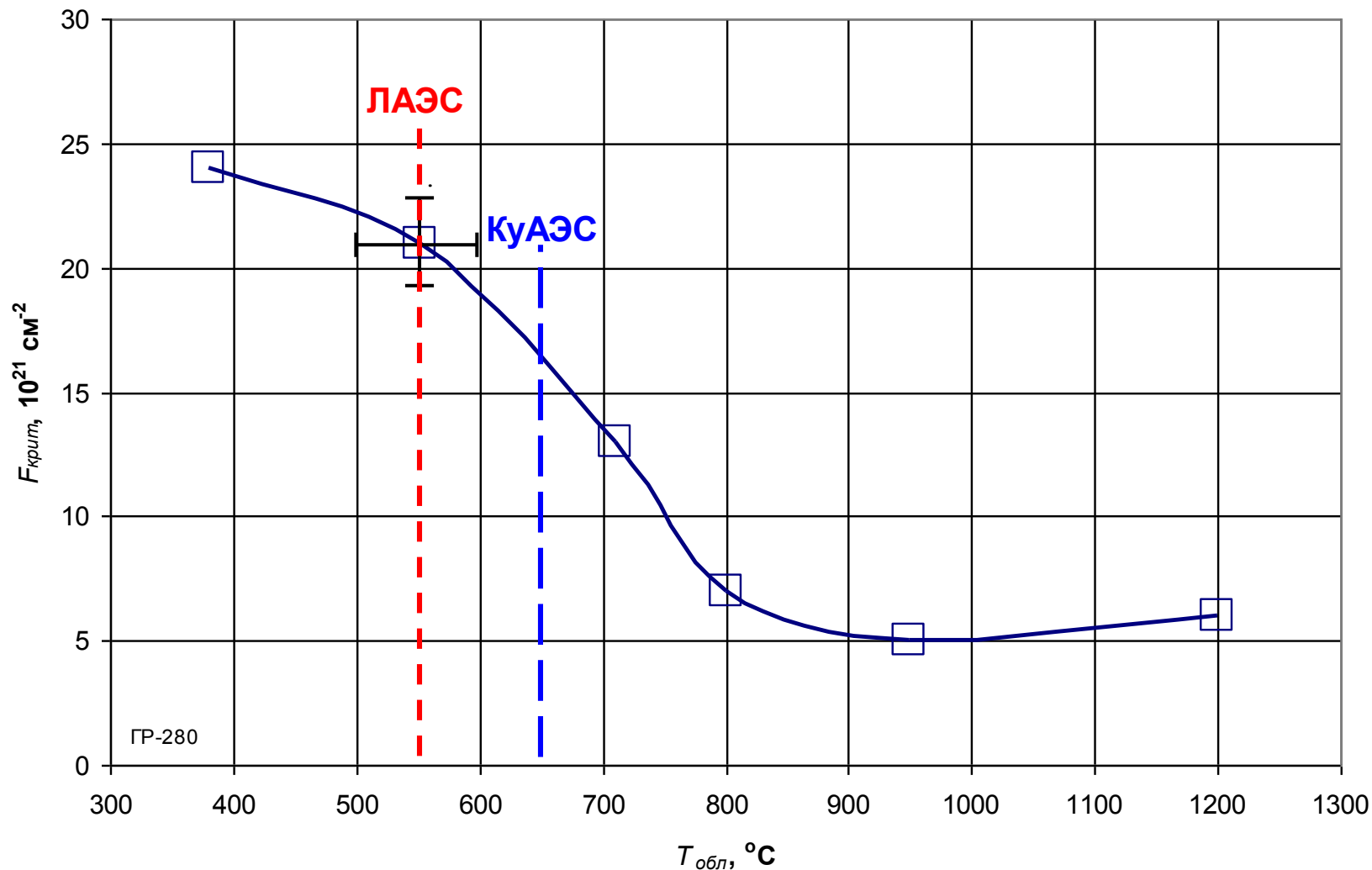
Критерий достижения критического флюенса нейтронов (Fкр)
(резкое ухудшение прочностных и теплофизических свойств графита)



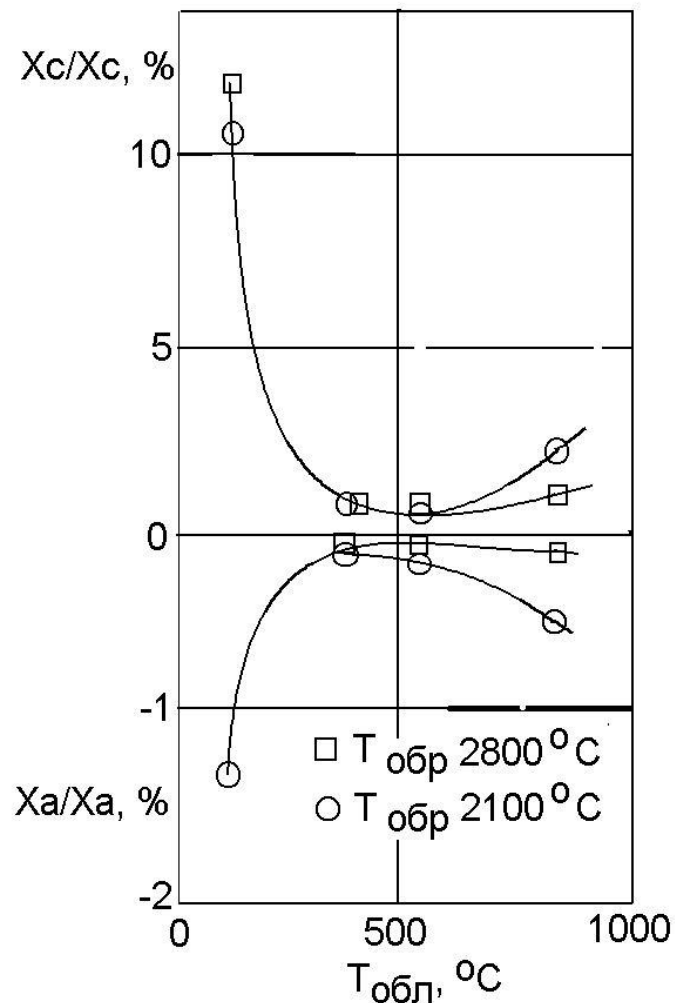
Определение критического флюенса нейтронов



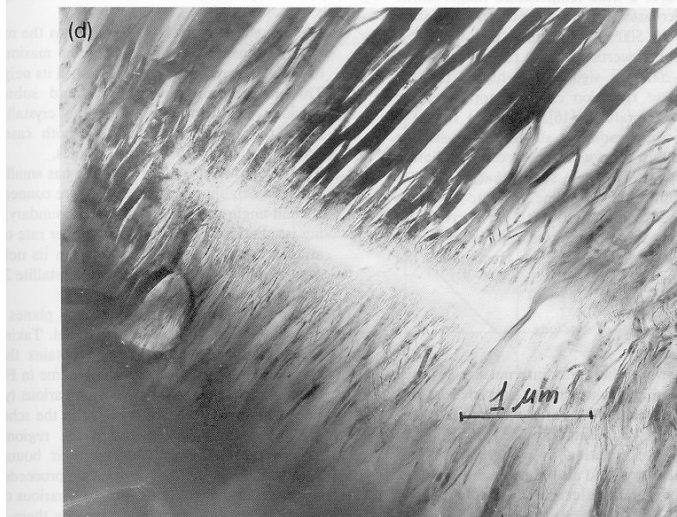
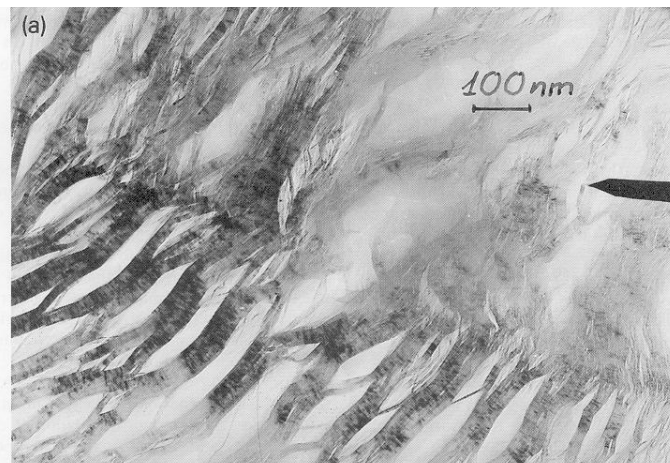
Температурная зависимость величины критического флюенса нейтронов $F_{кр}$



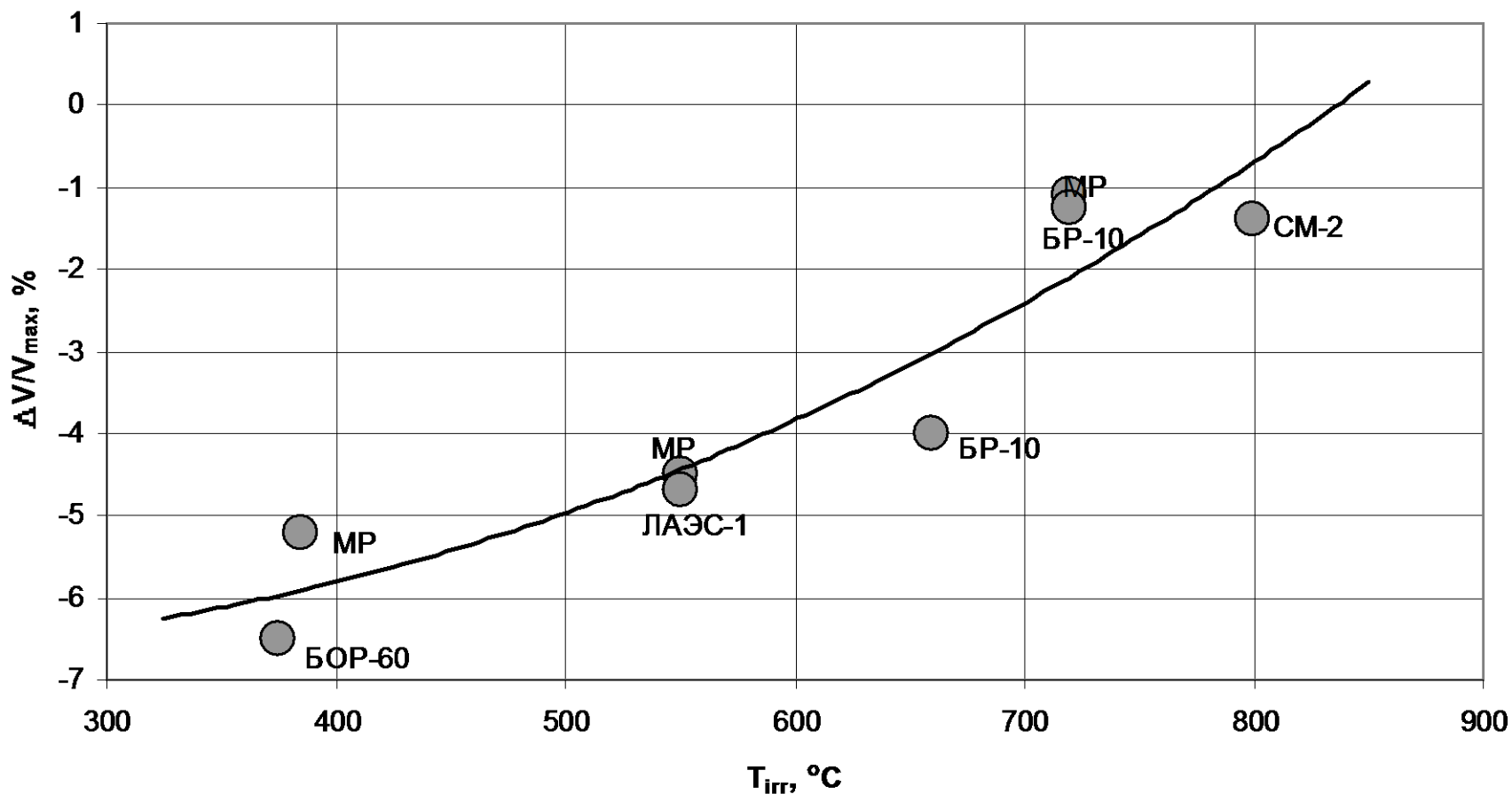
Относительное формоизменение образцов пиррографита с различной термообработкой, в зависимости от температуры облучения



Кинетика деградации графита ГР-280 под действием облучения



Зависимость максимальных объемных изменений графита ГР-280 от температуры облучения



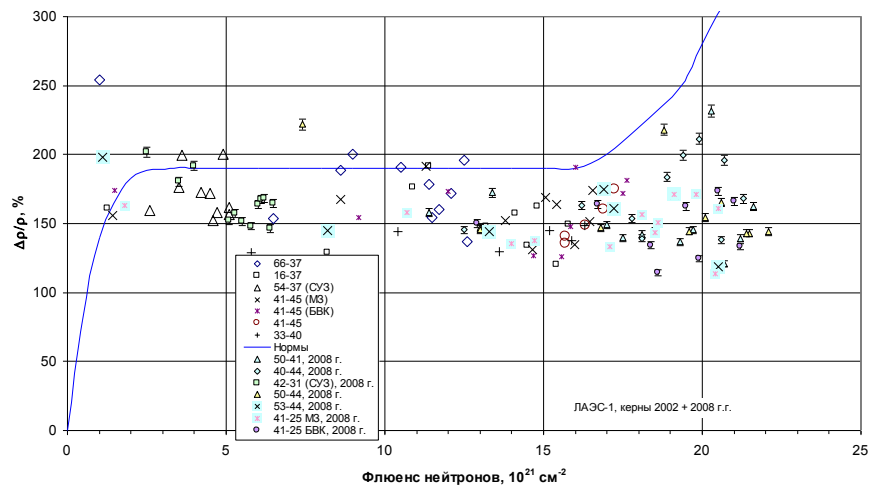
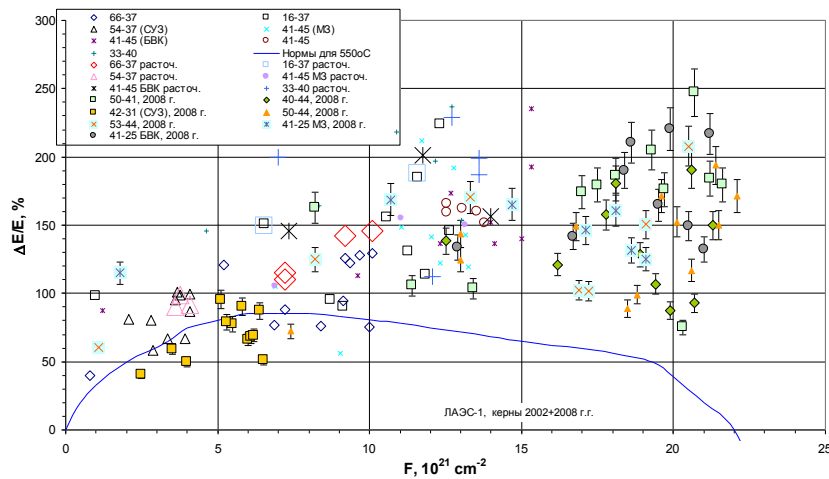
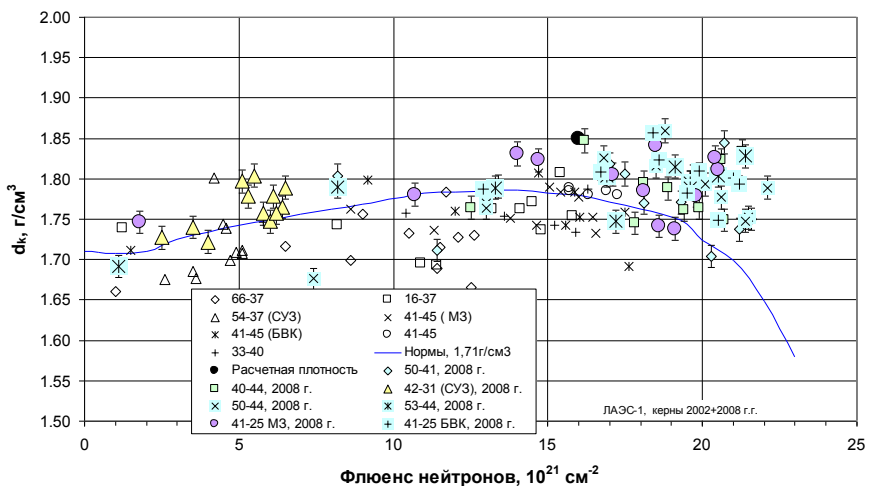
Соотношение между флюенсом достижения
максимальной усадки графита F_{\max} и $F_{\text{кр}}$

Реактор	$T_{\text{обл.}}, ^\circ\text{C}$	$\frac{F_{\text{кр}} (\Delta V/V = 0)}{F (\Delta V/V_{\text{max}})}$	Плотность потока нейтронов, ϕ , нейтрон/см ² ·с
МР	550	1,5	10^{14}
БР-10	720	1,5	10^{15}
СМ-2	800	1,7	$2 \cdot 10^{14}$

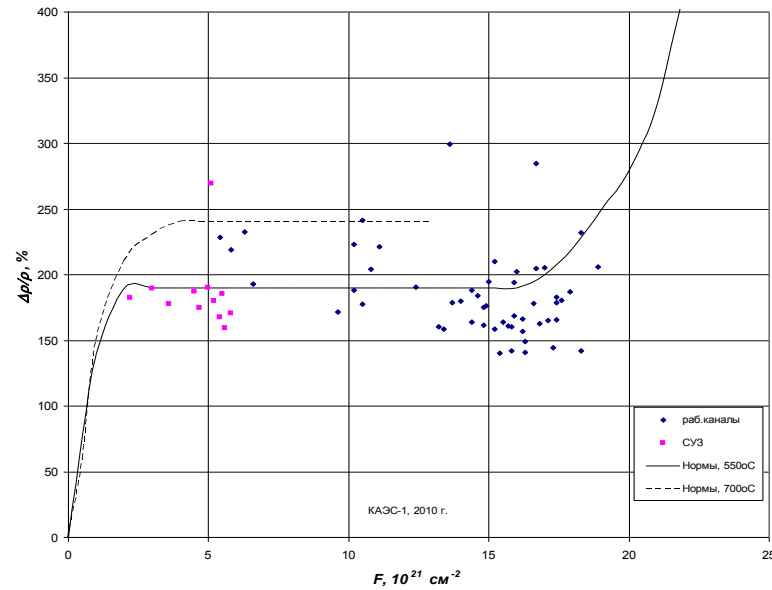
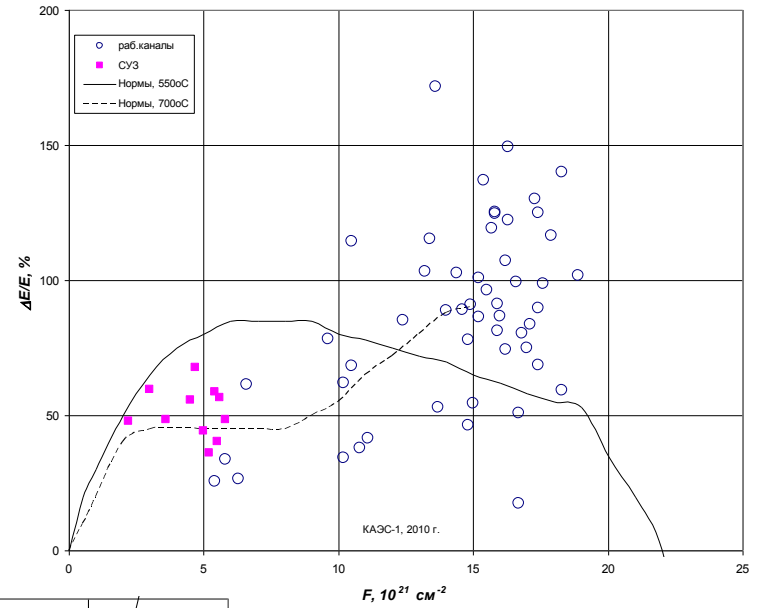
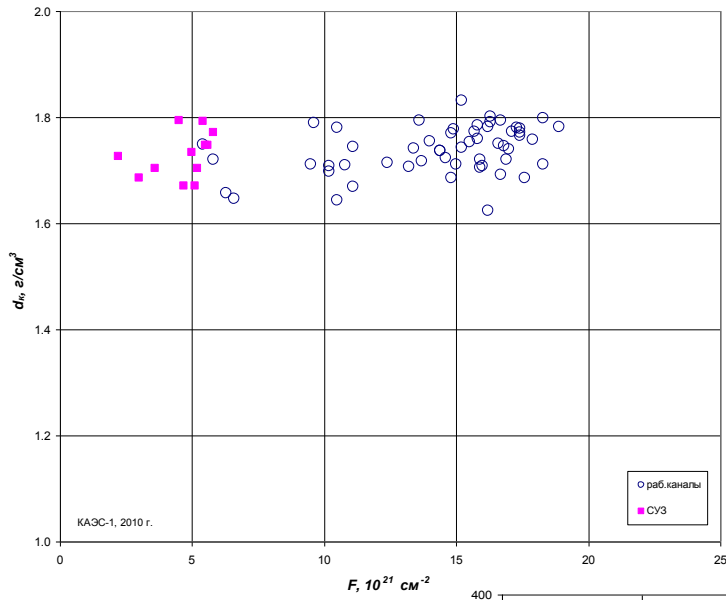
Среднее = 1,55



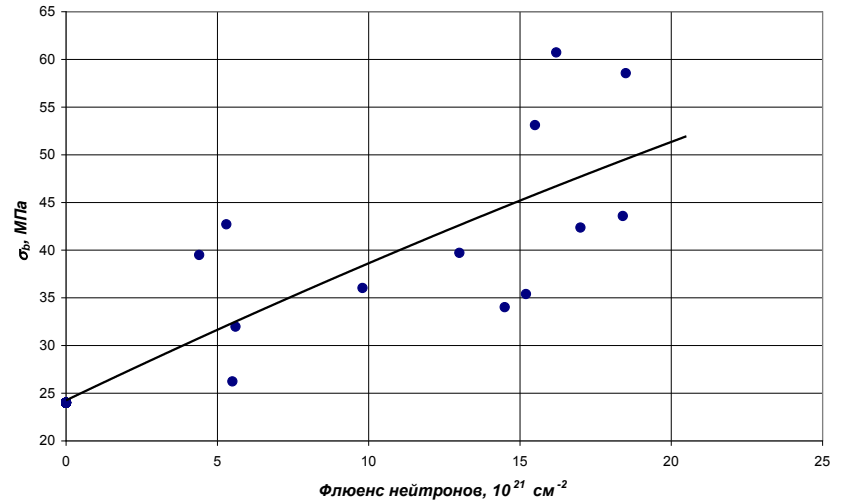
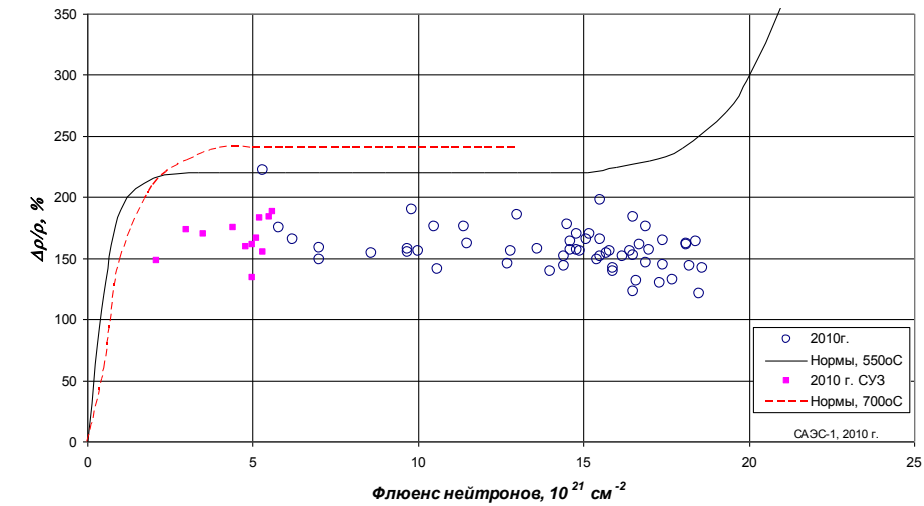
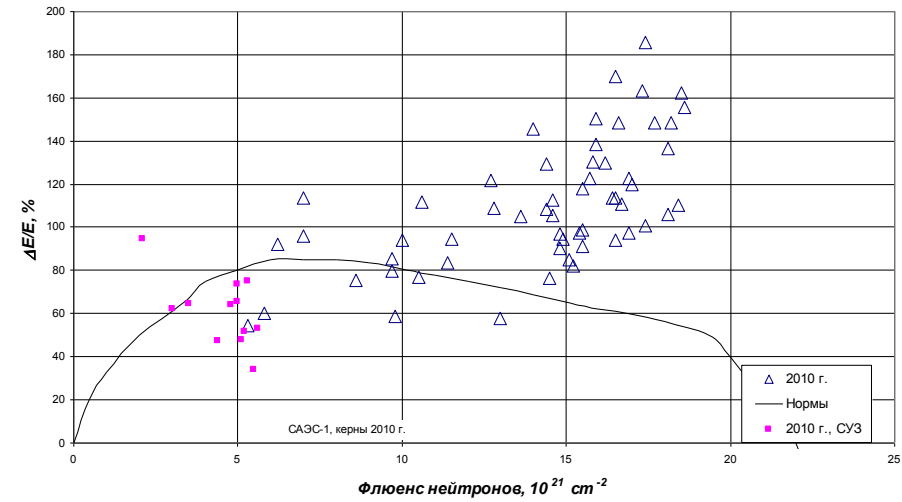
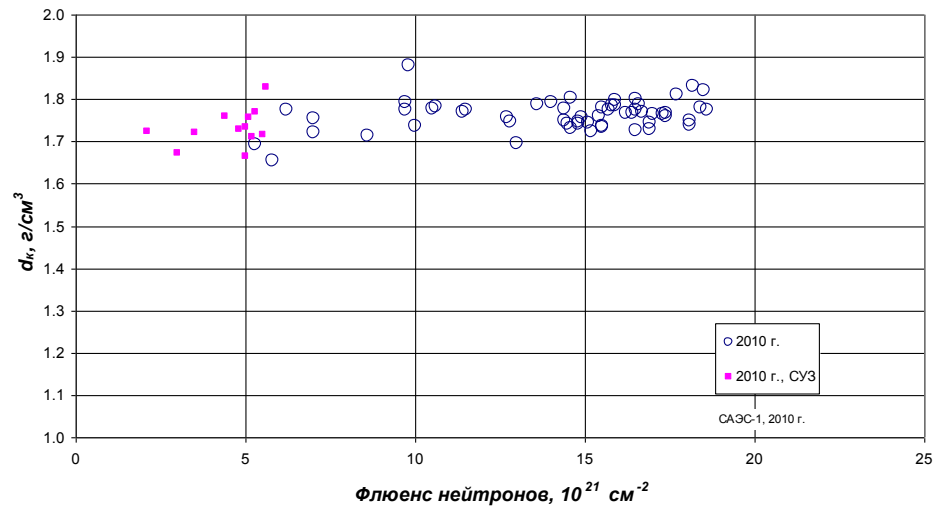
Изменение свойств графита кернов из кладки реактора ЛАЭС-1



Изменение свойств графита кернов из кладки реактора КуАЭС-1



Изменение свойств графита кернов из кладки реактора САЭС-1



Выводы и рекомендации

Исследование свойств кернов, взятых из кладок различных реакторов, позволило обосновать увеличение значения $F_{кр}$ (которое оказалось существенно больше чем величина $F_{кр}$, полученная на образцах), что в свою очередь позволило обосновать возможность безопасной работы реакторов в продлённом периоде эксплуатации.

Анализ условий эксплуатации графитовых кладок различных реакторов показал необходимость проведения работ по продлению срока службы индивидуально для каждого энергоблока.



*Критерий растрескивания графитовых блоков и
искривления графитовых колонн*



Схема распределения температуры и флюенса нейтронов в графитовом блоке. Характер напряжений и раскрытие продольной трещины

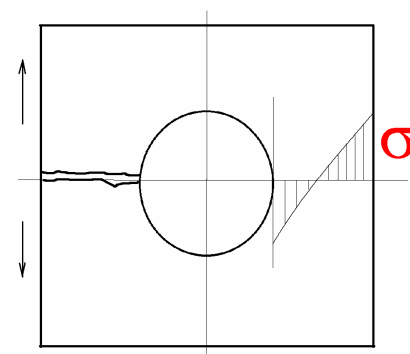
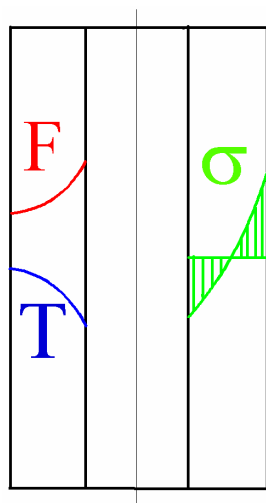
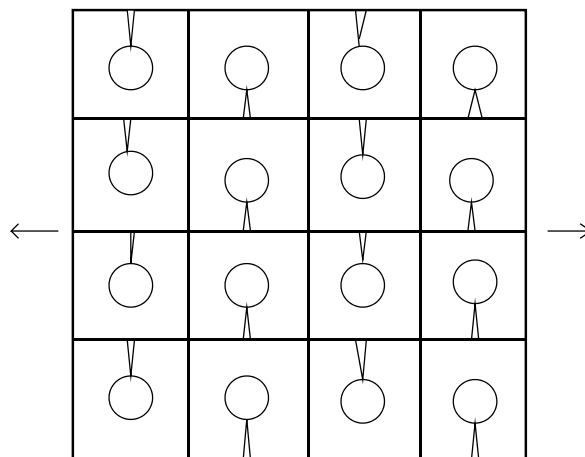
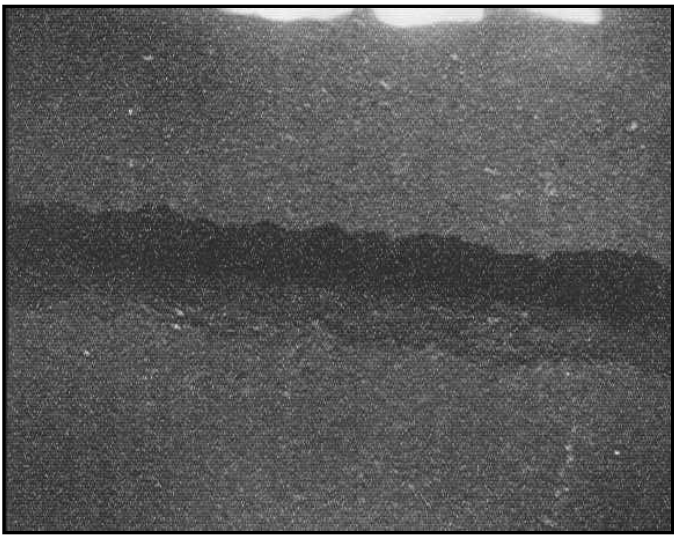
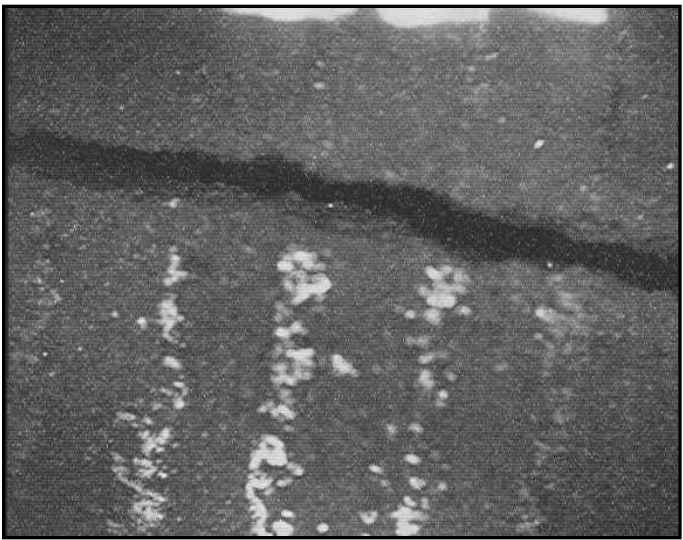
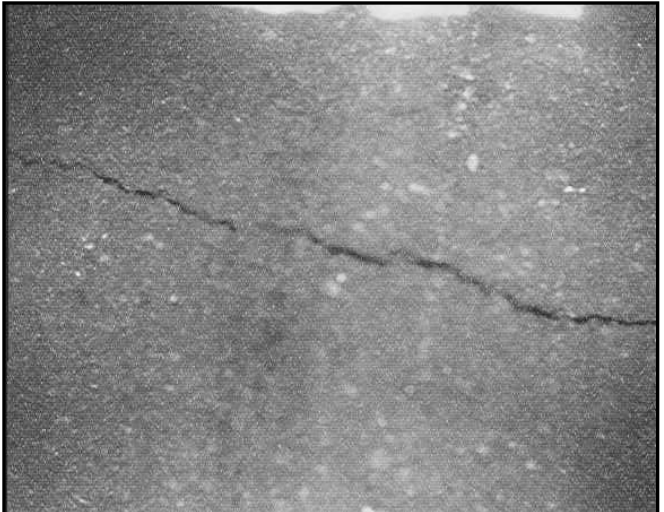
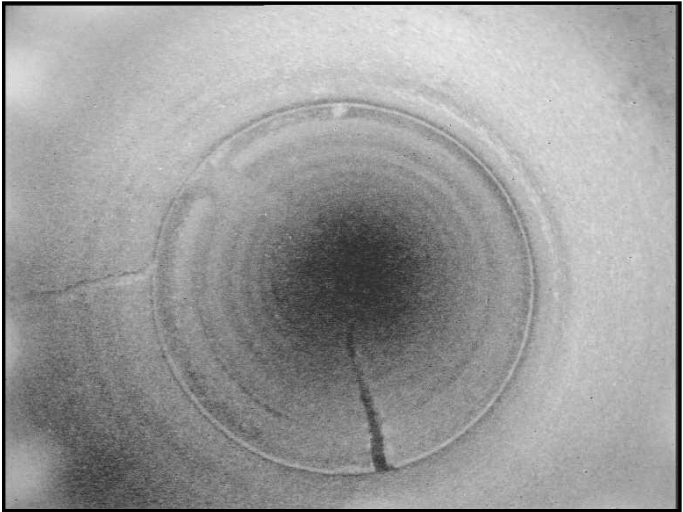


Схема деформации графитовой кладки за счет раскрытия трещин

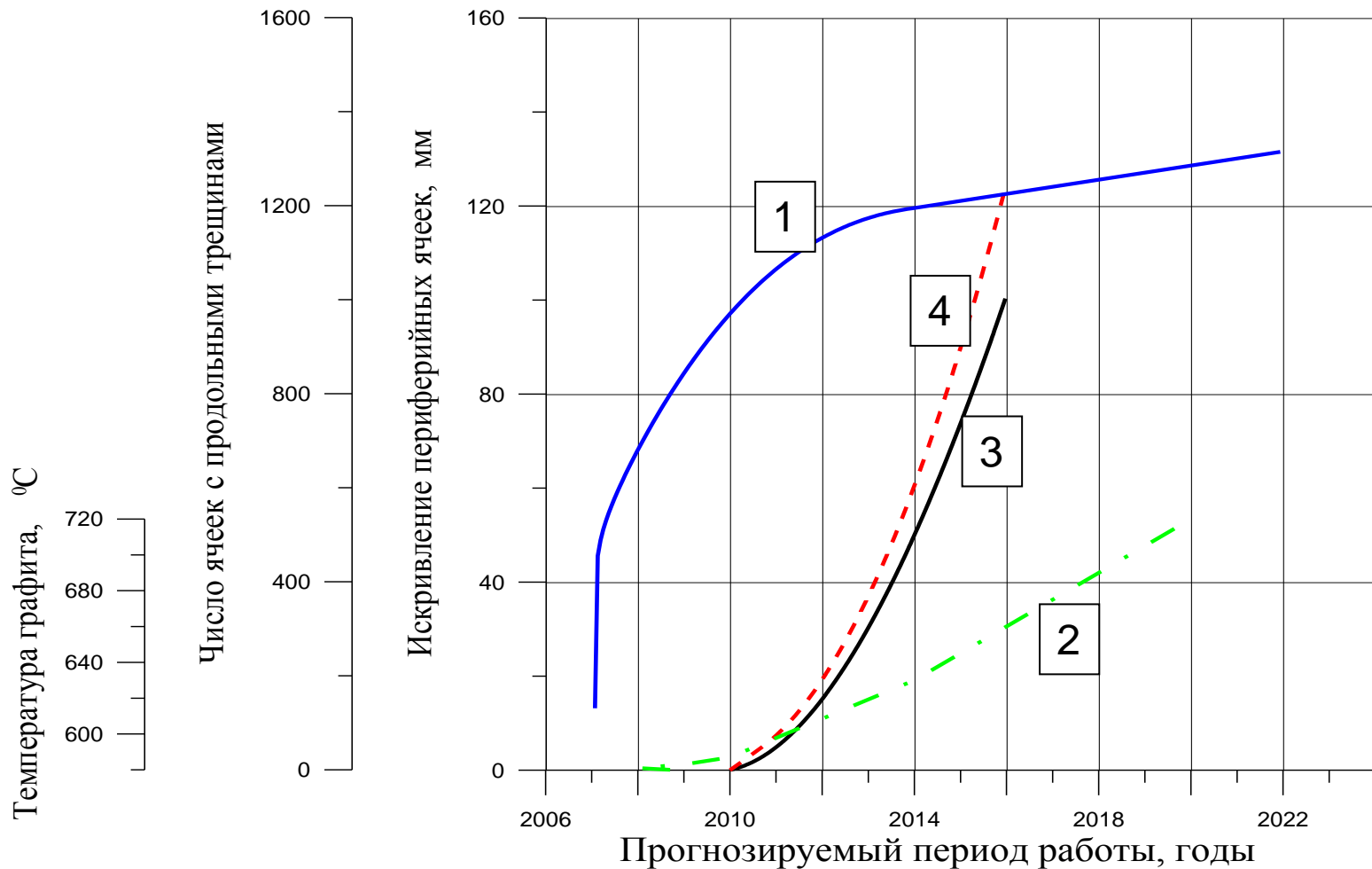


Трещины в графитовых блоках по результатам осмотра при обследовании в 2008 г. энергоблока №1 ЛАЭС



Прогноз накопления трещин в кладке ЛАЭС-1

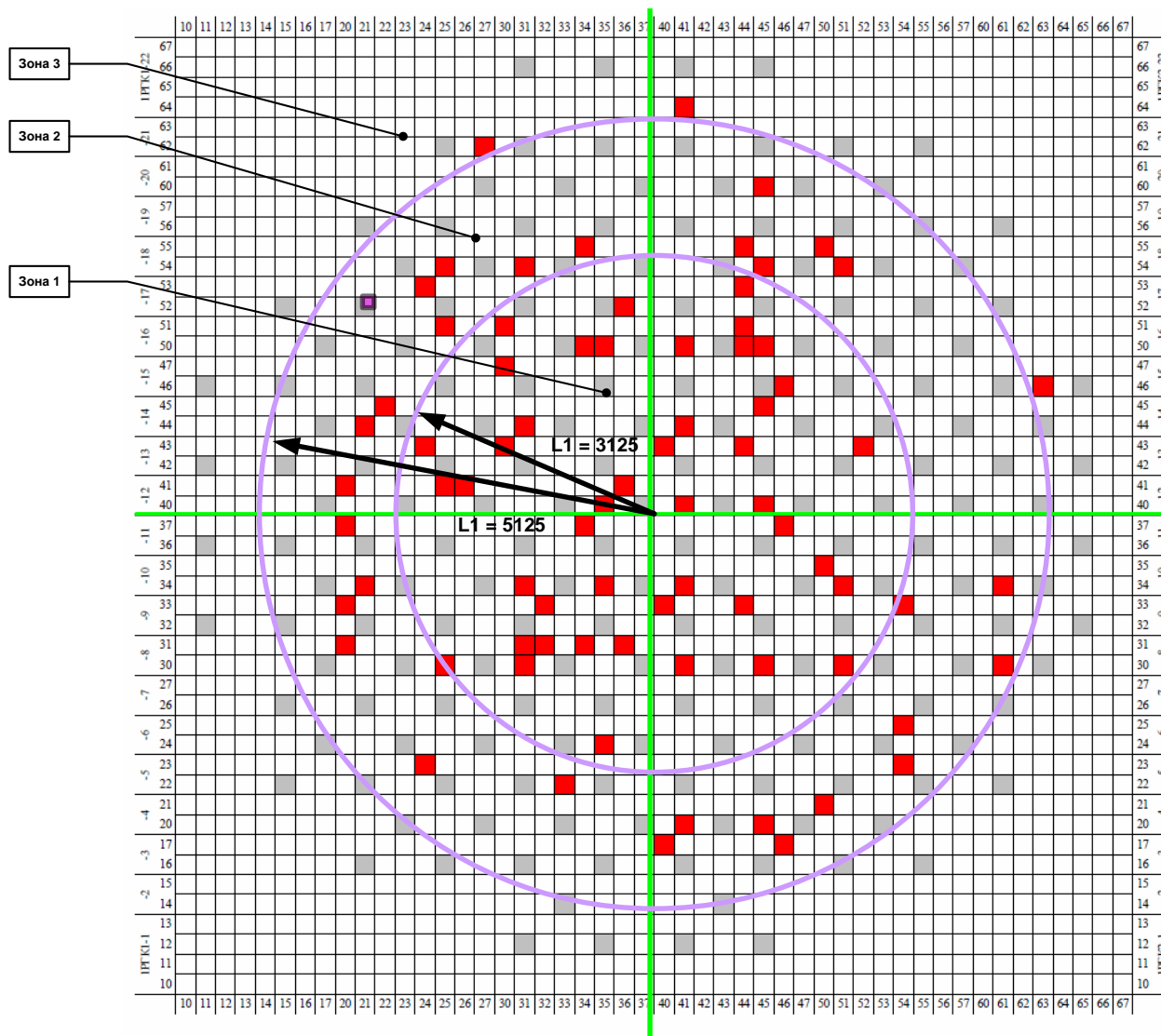
(прирост энерговыработки принят ~600 МВт*сут/год)



- 1 – Накопление трещин. 2 – Температура. 3 – Стрела прогиба.
4 – Стрела прогиба (с учетом роста температуры)



Расположение зон искривления графитовых колон при обследовании кладки энергоблока №1 ЛАЭС в 2011 г.



Выводы

Подтверждена возможность эксплуатации кладок в условиях ускоренного формоизменения графита при условии постоянного мониторинга геометрических параметров кладок, а также взятие кернов графита.

В целях минимизации темпа искривления графитовых колон, являющегося основным критерием, ограничивающим срок эксплуатации кладки в условиях массового растрескивания графитовых блоков, необходимо:

- провести дальнейшую верификацию расчетных методик для снятия излишнего консерватизма в расчётах;
- Концерну «Росэнергоатом» совместно с Главным конструктором и Научным руководителем определить условия оптимальной эксплуатации энергоблоков.

