

УДК 621.039.532.21

## ЗАПАСЕННАЯ ЭНЕРГИЯ В ГРАФИТЕ КЛАДОК ОСТАНОВЛЕННЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ УРАН-ГРАФИТОВЫХ РЕАКТОРОВ

А.А. Цыганов, П.Г. Савиных, Е.А. Комаров, С.Г. Котляревский, А.О. Павлюк, И.В. Шаманин\*, В.Н. Нестеров\*

ФГУП «Сибирский химический комбинат», г. Северск

\*Томский политехнический университет

E-mail: shaman@phtd.tpu.ru

*Произведена консервативная оценка величины температуры графита самых «опасных» деталей графитовой кладки промышленного уран-графитового реактора И-1 (верхних втулок рабочих ячеек и ячеек системы управления и защиты и обогащенного металла), до которой возможен их разогрев за счет самоподдерживающегося выделения запасенной энергии. Ее величина значительно превысила температуру возгорания графита (700 °С). Реализация условий, для которых был сделан расчет, на практике имеет ничтожно малую вероятность. Установлено, что для полного исключения самоподдерживающегося выделения запасенной энергии можно рекомендовать извлечь из кладки промышленного уран-графитового реактора И-1 верхние 2–3 втулки из рабочих ячеек и полностью комплекты втулок из ячеек системы управления и защиты и обогащенного металла.*

### Введение

Вопрос снятия с эксплуатации ядерных установок с промышленными уран-графитовыми реакторами (ПУГР) представляет собой комплекс проблем, связанных с необходимостью выбора оптимальных способов и методов обращения с накопленными радиоактивными отходами (РАО). Среди всей массы накопленных РАО отработанный графит ПУГР занимает особое место. После длительного облучения графит не приобрел никаких свойств, которые могли бы ему создать область полезного применения. Поэтому облученный графит относится к категории неиспользуемых РАО и требует индивидуального подхода при выборе способов обращения с ним. Это связано со многими факторами:

1. Реакторный графит имеет уникальную кристаллическую и пористую структуру, которые определяют его физические свойства и их поведение как при облучении, так и после.
2. Графитовая кладка является основным элементом активной зоны ПУГР, который не подлежит замене в течение всего срока эксплуатации и среди всех РАО имеет наибольший набранный флюенс нейтронов.
3. Графит блоков кладок и втулок ПУГР имеет ряд особенностей по величине, изотопному составу радиоактивных загрязнений и характеру распределения радионуклидов как по объему кладок в целом, так и по отдельным графитовым деталям [1]. Радиоактивная загрязненность графитовых деталей определяется: наведенной активностью (в основном  $^{60}\text{Co}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ) за счет активации примесей, содержащихся в исходном материале. При этом  $^{14}\text{C}$ , который составляет 95 % активности графита входит в биологические цепочки. Кроме продуктов активации активность графита определяется радионуклидами, попавшими в кладку при протечках теплоносителя и инцидентах с разгерметизацией ТВЭЛ и попаданием делящегося материала в кладку.

4. Графит является пожароопасным материалом с высокой удельной теплотой сгорания (8 ккал/г, температура воспламенения составляет величину около 700 °С). Этот факт усугубляется наличием в облученном графите запасенной энергии (энергии Вигнера) [2].

На сегодняшний день на площадке РЗ-5 Сибирского химического комбината (СХК) находятся три остановленных ПУГР: И-1, ЭИ-2, АДЭ-3. Суммарная масса их графитовых кладок составляет 4600 т. Кроме кладок на площадке РЗ-5 хранится около 3000 т облученных графитовых втулок. Места размещения втулок: непосредственно графитовые кладки, хранилища и технологические шахты реакторов.

Существенное значение имеет эффект, обусловленный накоплением графитом запасенной энергии в процессе нейтронного облучения. С одной стороны данные о механизмах накопления и выделения энергии Вигнера могут служить инструментом для определения радиационной поврежденности графита и, следовательно, для прогнозирования ресурса эксплуатации материала. С другой стороны информация о накоплении и выделении запасенной энергии имеет большое значение при обосновании безопасности в процессе выработки концепции обращения с графитом выводимых из эксплуатации ПУГР, что было подчеркнуто в предложениях российской и британской сторон на российско-британском семинаре «Обращение и утилизация облученного графита» (С.-Петербург, Соновый Бор, 2001 г.).

Одним из наиболее важных факторов, влияющих на величину и условия выделения запасенной энергии в графите ПУГР, является рабочая температура графита. Понижение температуры облучения «уводит» реакторный графит в более «опасную» область. А именно, происходит увеличение самой величины запасенной энергии, снижается температура начала ее выделения, становится возможным ее самоподдерживающееся выделение.

Предметом исследований данной работы является детальное изучение особенностей накопления и выделения запасенной энергии в графитовых конструкциях ПУГР И-1, который эксплуатировался в проточном режиме и, следовательно, его графитовые детали имели более низкую температуру, чем на ПУГР с замкнутым первым контуром. Кроме того, в отличие от других остановленных ПУГР СХК, в кладке И-1 имеются комплекты графитовых втулок со сроком эксплуатации от 2-х до 22-х лет, что позволяет оценить влияние на значение запасенной энергии флюенса быстрых нейтронов.

Диапазон рабочей температуры графита деталей кладки И-1 охватывает диапазоны рабочей температуры графитовых деталей кладок других ПУГР СХК. Срок эксплуатации реактора И-1 больше, или сопоставим со сроками эксплуатации реакторов ЭИ-2, АДЭ-3. Поскольку марки графита втулок и блоков этих реакторов идентичны, то закономерности, полученные в данной работе, могут быть применены для определения запасенной энергии графита деталей кладок других ПУГР.

#### Анализ результатов измерений

В результате проведенной работы были получены спектры выделения запасенной энергии для каждого из отобранных образцов. В процессе математической обработки полученных спектров была рассчитана интегральная величина запасенной энергии. По форме спектров также определены температуры начала выделения запасенной энергии, оценена возможность самоподдерживающегося выделения, а также определен интервал температур, в котором возможно самоподдерживающееся выделение этой энергии.

#### Связь запасенной энергии с температурой облучения для графитовых втулок и блоков

Анализ результатов показал, что имеет место четкая корреляция между температурой облучения втулок и количеством запасенной графитом энергии. Так, в наиболее «холодных», а именно верхних втулках ячеек системы управления и защиты (СУЗ) и ячеек с обогащенным металлом (ОМ), ее величина достигает 400...450 кал/г. Гораздо меньшую величину запасенной энергии, не смотря на более высокий флюенс по быстрым нейтронам, имеют втулки, эксплуатировавшиеся при наиболее высокой температуре – центральные втулки ячеек, загружавшихся рабочими блоками. В этом случае ее величина составляет около 45...60 кал/г (срок службы комплектов от 2 до 22 лет). Наиболее наглядно корреляция рабочей температуры втулок и величины запасенной энергии проявляется в распределениях запасенной энергии втулок по высоте кладки (рис. 1).

Видно, что для рабочих ячеек, несмотря на более высокий (в 6...7 раз) поток по быстрым нейтронам в центральной части по сравнению с верхними и нижними отметками кладки, запасенная энергия

графита втулок центральной части кладки (около 50 кал/г) в 5 раз ниже, чем в верхних втулках (около 250 кал/г) и в 3 раза ниже, чем в нижних втулках (около 130 кал/г).

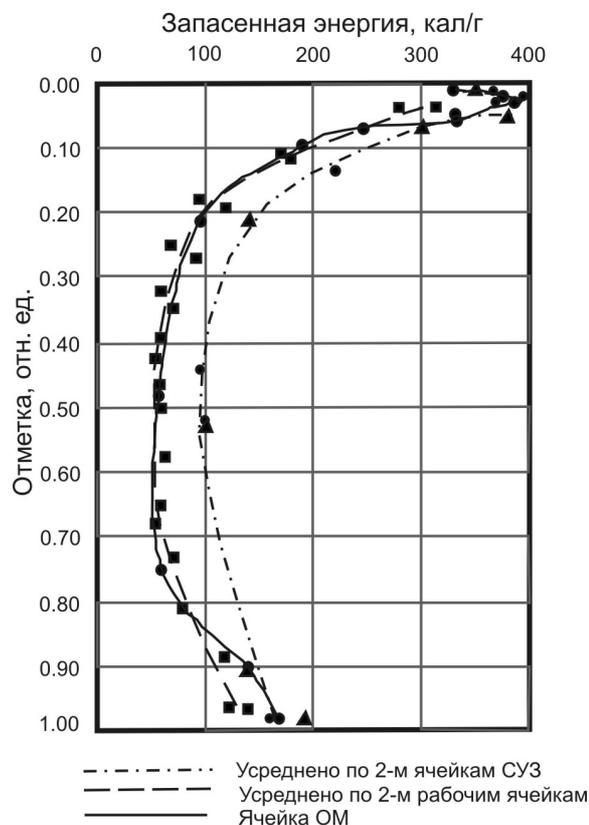


Рис. 1. Распределение запасенной энергии графита втулок по высоте кладки ПУГР И-1

В ячейках СУЗ распределение величины запасенной энергии графита втулок по высоте кладки имеет ту же форму, что и распределение в рабочих ячейках. Но, за счет более низкой температуры облучения, сама величина запасенной энергии на одних и тех же отметках в ячейках СУЗ в 1,5 раза выше, чем в рабочих ячейках (400 кал/г в верхних втулках, 90 кал/г – в центральных, 180 кал/г – в нижних). Распределение запасенной энергии по высоте ячеек ОМ представляет собой своеобразную комбинацию распределений в рабочих ячейках и ячейках СУЗ. Так, в центральной части кладки, где расположены блоки ОМ, кривая распределения запасенной энергии практически совпадает с кривой распределения для рабочих ячеек. В верхней и нижней частях ячеек, где отсутствуют блоки ОМ, кривая стремится к распределению, характерному для ячеек СУЗ.

Для графитовых блоков кладки ПУГР И-1 распределение запасенной графитом энергии по высоте кладки (рис. 2) носит тот же характер, что и для втулок, а именно, в центральной части кладки величина запасенной энергии меньше в 5 раз, по сравнению с верхними отметками, и в 3 раза – по сравнению с нижними.

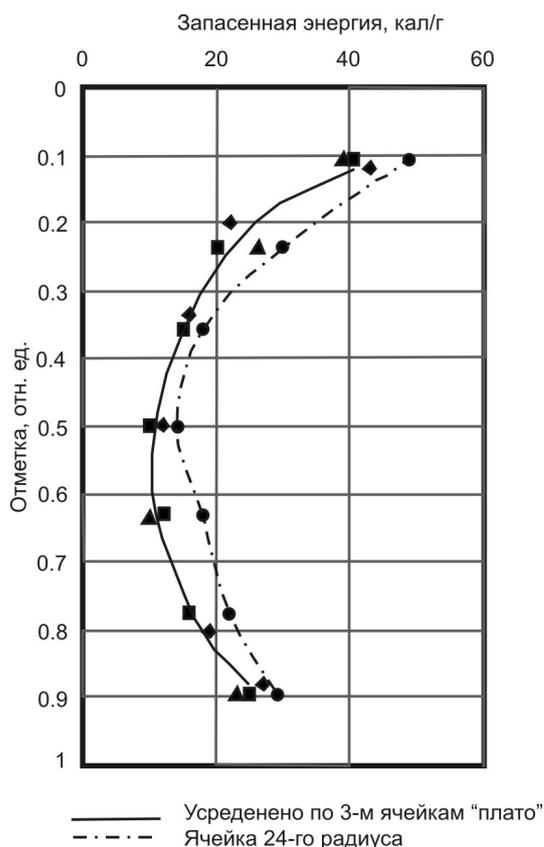


Рис. 2. Распределение запасенной энергии графита блоков по высоте кладки ПУГР И-1

При этом в ячейках «плато» нейтронного потока на верхних отметках величина запасенной энергии составляет около 50 кал/г, на нижних отметках – около 25 кал/г, в центральной части кладки – около 10 кал/г. Для ячейки 24-го радиуса величина температуры начала выделения запасенной энергии несколько ниже, а сама запасенная энергия выше. Например, на верхних отметках запасенная энергия составляет около 60 кал/г, на нижних отметках – около 30 кал/г, в центральной части кладки – около 15 кал/г.

Следует отметить, что при эксплуатации ПУГР И-1 в активной зоне находилось всего 12 двойных (точки контроля –9000 мм и –13000 мм) термопар, расположенных в углах графитовых колонн. Поэтому не существует данных о величине рабочей температуры всех графитовых деталей кладки, о ее распределении по объему кладки и по сечению отдельных графитовых деталей. Тем не менее, получая спектр выделения запасенной энергии, можно однозначно определить температуру начала ее выделения, которая, в свою очередь, жестко связана с температурой облучения графита.

Таким образом, имея возможность определения рабочей температуры графита по спектру выделения запасенной энергии, была построена область значений величины запасенной энергии графита блоков и втулок в зависимости от температуры (рис. 3).

Характерно, что наиболее резкий спад величины запасенной энергии с ростом температуры облучения наблюдается при более низких температурах облучения. Так, при сравнении спектров выделения запасенной энергии графита верхних втулок рабочих ячеек с верхними втулками ячеек СУЗ и ОМ получено, что при небольшом различии температур облучения втулок запасенная энергия верхних втулок ячеек СУЗ и ОМ составляет около 400 кал/г, рабочих ячеек – около 250 кал/г.

Область значений запасенной энергии втулок и область значений запасенной энергии графита блоков выстраиваются в одну общую зависимость от рабочей температуры (рис. 3).

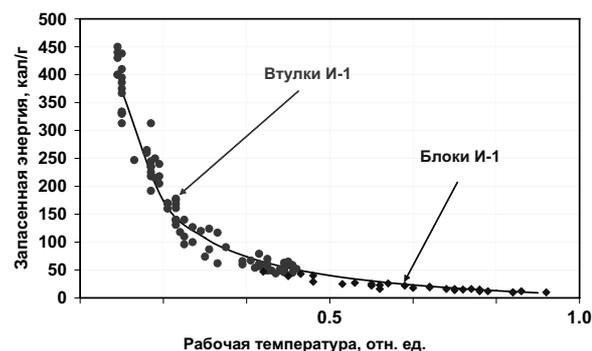


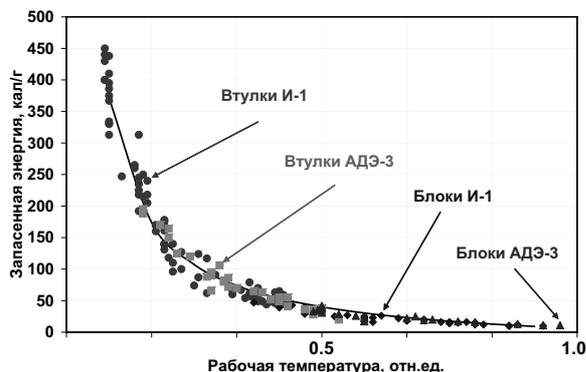
Рис. 3. Зависимость величины запасенной энергии графита от рабочей температуры графитовых деталей ПУГР И-1

Разброс значений запасенной энергии графита кладки ПУГР И-1 относительно кривой, аппроксимирующей эту зависимость, не превышает 25 %.

Диапазон значений эксплуатационных характеристик графита кладки ПУГР И-1 (флюенс по быстрым нейтронам, рабочая температура), влияющих на величину запасенной энергии, охватывает диапазоны значений этих характеристик для кладок остановленных ПУГР ЭИ-2 и АДЭ-3. А именно, так как ПУГР И-1 эксплуатировался в проточном режиме, то температура самых «холодных» графитовых деталей (верхние втулки) была ниже, чем на ПУГР ЭИ-2 и АДЭ-3. Наибольшая температура графита (в углах графитовых блоков центральной части кладок всех трех ПУГР) отличалась незначительно. Срок эксплуатации реактора И-1 (35 лет) больше, чем сроки эксплуатации реакторов ЭИ-2 (32 года) и АДЭ-3 (31 год). Поэтому флюенс по быстрым нейтронам для блоков графитовой кладки И-1 выше, чем для блоков кладок ЭИ-2 и АДЭ-3. Нижний предел диапазона флюенса, набранного графитовыми втулками соответствует сроку работы комплектов втулок 2 года, то есть минимальному сроку работы втулок в кладках всех трех ПУГР РЗ-5. Следовательно, пользуясь данными по рабочей температуре графита деталей кладок данных ПУГР, можно определять величину запасенной энергии с погрешностью  $\pm 25\%$ .

Это подтверждается тем, что значения запасенной энергии, полученные для втулок и блоков графитовой кладки ПУГР АДЭ-3, ложатся на полу-

ченную зависимость запасенной энергии от рабочей температуры с отклонением также не более 25 % (рис. 4).



**Рис. 4.** Зависимость величины запасенной энергии графита от рабочей температуры графитовых деталей ПУГР И-1 и АДЭ-3

Разброс значений запасенной энергии  $\pm 25\%$  определяется как погрешностью измерений, так и зависимостью величины запасенной энергии от флюенса по быстрым нейтронам. Поэтому для получения картины динамики накопления запасенной энергии в графите деталей кладок ПУГР была проведена работа по определению степени влияния флюенса по быстрым нейтронам на величину запасенной энергии.

**Связь запасенной энергии с набранным флюенсом по быстрым нейтронам для графитовых втулок и блоков**

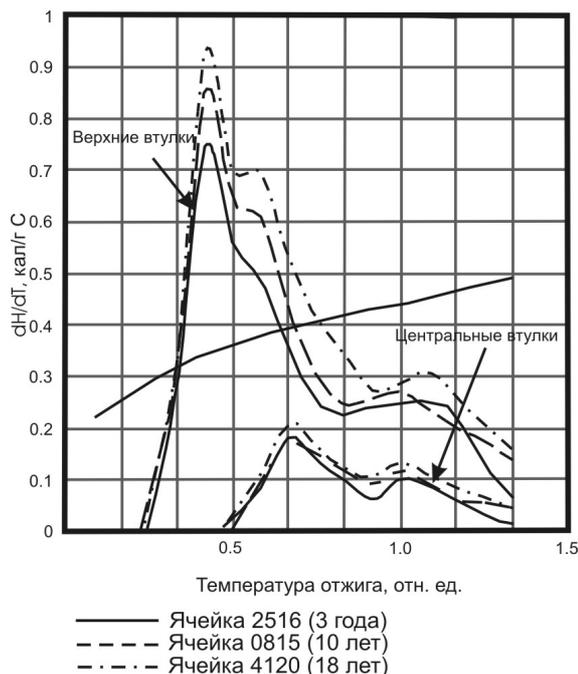
Как было показано выше, имеет место жесткая корреляция между величиной запасенной энергии графита и его температурой при работе ПУГР на мощности. Поэтому для определения влияния флюенса по быстрым нейтронам на величину запасенной энергии необходимо получение экспериментальных зависимостей запасенной энергии для графита деталей кладки ПУГР И-1 с различной величиной набранного флюенса, эксплуатировавшихся при одной температуре. Соблюдение данного условия возможно только для втулок с различным сроком работы в кладке. Таким образом, для построения данных зависимостей были выбраны верхние втулки и центральные втулки рабочих ячеек.

Наиболее наглядно динамика роста величины запасенной энергии при возрастании флюенса по быстрым нейтронам иллюстрируется рис. 5.

Видно, что по мере возрастания срока работы втулок величина скорости выделения запасенной энергии возрастает во всем интервале температуры отжига, а, следовательно, растет и интегральная величина запасенной энергии. При этом данный рост характерен как для верхних, так и для центральных втулок.

Были получены зависимости величины запасенной энергии графита верхних и центральных втулок рабочих ячеек, расположенных в области

«плато» нейтронного потока, от срока службы комплектов втулок. Обнаружено, что при увеличении срока службы от 2 до 19 лет, то есть на порядок, рост величины запасенной энергии составляет: для верхних втулок — от 200 до 280 кал/г (около 40 %), для центральных — от 45 до 60 кал/г (около 30 %). Поскольку втулки, по которым построена данная зависимость, охватывают весь диапазон по рабочей температуре и сроку службы втулок рабочих ячеек ПУГР И-1, то область значений величины запасенной энергии, характерных для графита втулок рабочих ячеек, будет составлять 45...280 кал/г.



**Рис. 5.** Спектры выделения запасенной энергии в графите верхних и центральных втулок из комплектов с различным сроком службы в графитовой кладке ПУГР И-1

После получения зависимости величины запасенной энергии графита втулок рабочих ячеек от флюенса по быстрым нейтронам. При этом было использовано относительное распределение потока быстрых нейтронов по высоте кладки. Среднее значение флюенса быстрых нейтронов по сечению графитового блока на «плато» нейтронного потока в плоскости максимума его распределения по высоте принято  $F=1$ .

После пересчета были получены зависимости величины запасенной энергии графита от флюенса по быстрым нейтронам для верхних и центральных втулок рабочих ячеек кладки ПУГР И-1 (рис. 6). При этом диапазон набранного флюенса по быстрым нейтронам составил: для верхних втулок от 0,011 до 0,1, для центральных — от 0,0733 до 0,715.

Данные зависимости получены эмпирическим путем только для верхних и центральных втулок рабочих ячеек. Для получения зависимостей величины запасенной энергии от флюенса по быстрым

нейтронам для графита деталей кладки ПУГР И-1, эксплуатировавшихся при других температурах, были использованы полученные эмпирически зависимости величины запасенной энергии  $H(F)$  от флюенса  $F$ , и зависимости величины запасенной энергии от температуры облучения  $H(t)$ . Процедура выполнялась следующим образом:

1. В качестве реперной зависимости величины запасенной энергии от флюенса выбирается одна из эмпирических зависимостей (либо для верхних, либо для центральных втулок).
2. Предполагая, что отношение реперной зависимости к искомой во всем диапазоне флюенса постоянно, можно считать справедливым выражение:

$$H(F, t) = H_{pen}(F) \cdot H(t) / H(t_{pen}),$$

где  $H(F, t)$  – искомая зависимость величины запасенной энергии от флюенса и температуры облучения;  $H_{pen}(F)$  – зависимость величины запасенной энергии от флюенса для графита с температурой облучения  $t_{pen}$ ;  $H(t)$  – зависимость величины запасенной энергии от температуры облучения (рис. 4);  $H(t_{pen})$  – величина запасенной энергии при температуре облучения  $t_{pen}$ , определенная по зависимости  $H(t)$ .

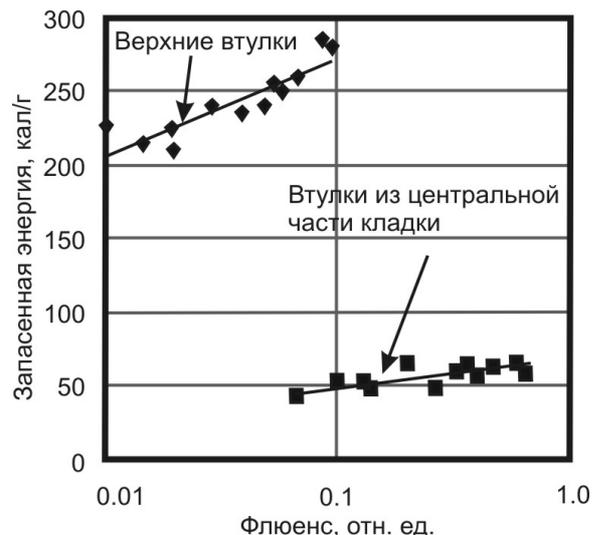


Рис. 6. Зависимость величины запасенной энергии графита втулок кладки ПУГР И-1 от флюенса по быстрым нейтронам

Чтобы проверить справедливость такого приближения была построена зависимость величины запасенной энергии графита от флюенса по быстрым нейтронам с использованием этого выражения для верхних и центральных втулок рабочих ячеек и сравнена с эмпирической зависимостью (рис. 6). Во всем диапазоне флюенса по быстрым нейтронам расхождение величин запасенной энергии не превышает 10 %. Следовательно, такой подход можно считать справедливым.

На рис. 7 показаны зависимости величины запасенной энергии графита от флюенса в интервале температур облучения графита деталей кладки

ПУГР И-1 и экстраполированные до  $F=1$ , которые были получены по предложенному соотношению.

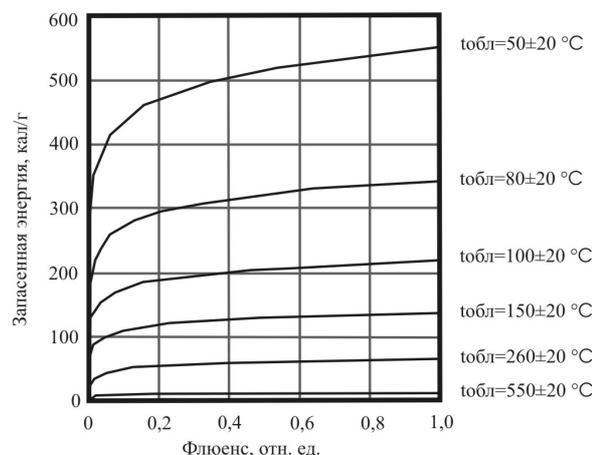


Рис. 7. Зависимость величины запасенной энергии графита деталей кладки ПУГР И-1 от флюенса по быстрым нейтронам и температуры облучения

Для графита блоков предложенное соотношение так же справедливо. Если рассчитать величину запасенной энергии графита блоков кладки ПУГР И-1 по соотношениям и сравнить ее с экспериментально полученной, то для блоков из:

- верхней части кладки на «плато» нейтронного потока расчетное значение составляет  $H_{расч} = 49$  кал/г, а экспериментальное  $H_{экс} = 39 \dots 43$  кал/г;
- центральной части кладки на «плато» нейтронного потока расчетное значение составляет  $H_{расч} = 2$  кал/г, экспериментальное  $H_{экс} = 10$  кал/г.

Под «плато» понимается та область активной зоны, в которой плотность потока повреждающих нейтронов и сопутствующего  $\gamma$ -излучения в различных ячейках (колоннах) отличается не более, чем на 5...7 %.

Аналогичный расчет величины запасенной энергии графита втулок и блоков кладки ПУГР АДЭ-3 дает такую же сходимость с экспериментальными результатами, что и для кладки И-1.

Таким образом, зависимость величины запасенной энергии графита от температуры облучения (рис. 4) и зависимость величины запасенной энергии графита от флюенса по быстрым нейтронам и температуры облучения (рис. 7) справедливы как для втулок, так и для блоков кладок И-1 и АДЭ-3. Имеют место закономерности общего характера [3]. Можно сделать вывод, что процесс накопления запасенной энергии втулочного графита (Б-16) и блочного графита (Б-15) описывается одной и той же закономерностью. Таким образом, зная температуру облучения графитовой детали, набранный флюенс по быстрым нейтронам и воспользовавшись предложенной закономерностью, можно определить величину запасенной энергии графита этой детали для любого из остановленных ПУГР СХК. При экстраполяции этого выражения на большой флюенс становится возможным опреде-

ление величины запасенной энергии графита деталей кладок действующих ПУГР АДЭ-4 и АДЭ-5, а также для других ПУГР, детали кладок которых изготовлены из тех же марок графита.

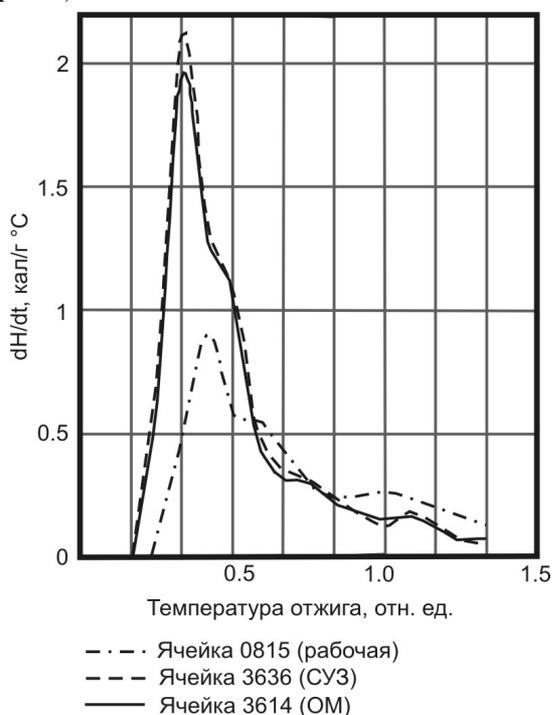
**Возможность возрастания температуры графита деталей кладки ПУГР И-1 за счет самоподдерживающегося выделения запасенной энергии**

Подъем температуры графита за счет самоподдерживающегося выделения запасенной энергии (без подвода тепла от внешних источников) возможен при соблюдении условия [4]:

$$dH / dt > C(t),$$

где  $dH/dt$  – скорость выделения запасенной энергии при температуре графита  $t$ ;  $C(t)$  – удельная теплоемкость графита при температуре  $t$ .

Самоподдерживающееся выделение запасенной энергии отнюдь не означает «спонтанное», то есть «без видимых причин». Для того чтобы спровоцировать выделение запасенной энергии в графите, необходимо нагреть графит за счет внешних источников тепла, как минимум до температуры, при которой начинается ее выделение. Необходимо также отметить, что указанное условие соблюдается не во всем интервале температуры отжига. Температурный интервал соблюдения условия ограничен температурами начала и окончания самоподдерживающегося выделения запасенной энергии, которые, в свою очередь, преимущественно определяется температурой облучения графита (рис. 8).



**Рис. 8.** Спектры выделения запасенной энергии в графите верхних втулок из рабочих ячеек, ячеек СУЗ и ячеек ОМ графитовой кладки ПУГР И-1

Условие самоподдерживающегося выделения запасенной энергии справедливо для адиабатического процесса, то есть в отсутствии теплообмена с окружающей средой. В случае отвода тепла для возможности самоподдерживающегося выделения запасенной энергии в графите необходимо, чтобы величина скорости выделения запасенной энергии была выше его теплоемкости и количества тепла, отводимой с единицы массы графита:

$$dH / dt > C(t) + q_{oms}(t),$$

где  $q_{oms}(t)$  – количества тепла, отводимое с единицы массы графита.

Таким образом, чем выше скорость выделения запасенной энергии ( $dH/dt$ ), тем более вероятен и интенсивен процесс самоподдерживающегося выделения запасенной энергии в графите. Если обратиться к предыдущему примеру (рис. 8), то видно, что в этом отношении графит верхних втулок ячеек СУЗ и ОМ более опасен, чем графит верхних втулок рабочих ячеек, поскольку он имел более низкую температуру облучения. В этом случае в интервале самоподдерживающегося выделения запасенной энергии скорость выделения запасенной энергии и интегральная ее величина для графита верхних втулок ячеек СУЗ и ОМ в 2 раза выше, чем для верхних втулок рабочих ячеек.

Результаты измерений показывают, что самоподдерживающееся выделение запасенной энергии возможно только для графитовых втулок, представленных в таблице. Для остальной массы графита кладки ПУГР И-1 самоподдерживающееся выделение запасенной энергии невозможно.

**Таблица.** Графитовые втулки, для которых возможно самоподдерживающееся выделение запасенной энергии

Комплекты втулок	Длина участка, м
Верхняя часть рабочих ячеек	1,0
Верхняя часть ячеек ОМ	1,2
Нижняя часть ячеек ОМ	0,5
Верхняя часть ячеек СУЗ	1,5
Нижняя часть ячеек СУЗ	1,0

Произведена консервативная оценка температуры графита наиболее «опасных» деталей кладки ПУГР И-1 (верхних втулок рабочих ячеек, ячеек СУЗ и ОМ), до которой возможен их разогрев при условии самоподдерживающегося выделения запасенной энергии. При расчете исходили из следующих предположений:

- температура графита самых «опасных» деталей кладки (верхних втулок рабочих ячеек, ячеек СУЗ и ОМ) достигла температуры начала самоподдерживающегося выделения запасенной энергии за счет внешних источников тепла;
- отсутствие теплоотвода от данных деталей;
- запасенная энергия графита этих деталей выделяется полностью.

Расчеты показали, что температура графита этих деталей после выделения запасенной энергии достигает величины намного выше температуры воспламенения графита, оцениваемой в 700 °С.

Реализация таких условий, для которых был сделан расчет, на практике имеет малую вероятность. Тем не менее, для полного исключения подобного варианта развития событий можно рекомендовать:

- извлечь верхние 2–3 втулки из рабочих ячеек;
- извлечь полностью комплекты втулок из ячеек СУЗ и ОМ.

При проведении работы по определению запасенной энергии деталей кладки ПУГР АДЭ-3 подобные рекомендации были даны только в отношении верхних втулок ячеек СУЗ и ОМ, поскольку за счет более высокой температуры втулок кладки ПУГР АДЭ-3 самоподдерживающееся выделение запасенной энергии возможно только для графита этих втулок. В этом отношении опасность графита втулок ПУГР И-1 более высока, чем графит втулок ПУГР АДЭ-3 и ЭИ-2 как за счет большего количества втулок, для которых возможно самоподдерживающееся выделение запасенной энергии, так и за счет большей массы втулок (толщина стенки втулок реактора И-1 составляет 20 мм, реакторов ЭИ-2 и АДЭ-3 – 10 мм).

#### Выводы

1. Величина запасенной энергии графита деталей кладки ПУГР И-1 составляет для блоков замедлителя 10...50 кал/г; втулок ячеек: рабочих каналов – 45...280 кал/г; СУЗ – 90...400 кал/г; ОМ – 50...450 кал/г.
2. Величина запасенной энергии графита втулок и блоков сильно зависит от температуры облучения. Этой зависимостью обусловлено распределение величины запасенной энергии графита как блоков, так и втулок по высоте кладки ПУГР И-1. В центральной области кладки величина запасенной энергии графита втулок и блоков в 4...5 раз ниже, чем в верхней, и в 2...3 раза ниже, чем в нижней.
3. Получена эмпирическая зависимость величины запасенной энергии графита кладки ПУГР И-1 от температуры облучения, которой подчиняется как блочный, так и втулочный графит. Разброс значений величины запасенной энергии относительно этой зависимости не превышает 25 %. Значения запасенной энергии графита деталей кладки ПУГР АДЭ-3 также подчиняются полученной зависимости. Поскольку марки графита втулок (Б-16) и блоков (Б-15) кладок идентичны, а диапазоны флюенса по быстрым нейтронам и температуры облучения графита кладки реактора И-1 охватывают диапазоны, характерные для ПУГР И-1, ЭИ-2 и АДЭ-3, то, пользуясь данными по рабочей температуре графита деталей кладок, можно определять величину запасенной энергии графита деталей кладок этих ПУГР с точностью  $\pm 25\%$ .
4. Получены эмпирические зависимости величины запасенной энергии графита втулок ПУГР И-1 от флюенса по быстрым нейтронам. При возрастании флюенса на порядок величина запасенной энергии монотонно возрастает примерно на 30 %. На основании этих зависимостей и зависимости величины запасенной энергии графита кладки от температуры облучения была получена зависимость величины запасенной энергии от флюенса и температуры облучения. Отклонение расчетных значений величины запасенной энергии от экспериментальных не превышает 20 %. Таким образом, пользуясь данными по флюенсу и рабочей температуре графита деталей кладок, можно расчетным путем определять величину запасенной энергии графита.
5. Установлены места локализации элементов кладки ПУГР И-1 (втулок), в которых возможно самоподдерживающееся выделение запасенной энергии графита. Для остальной массы графита кладки этот процесс невозможен. Таким образом, вывод реакторов ПУГР из эксплуатации является безопасным с точки зрения выделения запасенной энергии графита.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цыганов А.А., Хвостов В.И., Комаров Е.А., Котляревский С.Г., Павлюк А.О., Шаманин И.В., Нестеров В.Н. Проблемы утилизации реакторного графита остановленных промышленных уран-графитовых реакторов // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310. – № 2. – С. 94–98.
2. Гончаров В.В., Бурдаков Н.С., Виргильев Ю.С. и др. Действие облучения на графит ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1978. – 272 с.
3. Бойко В.И., Шидловский В.В., Гаврилов П.М. и др. Оценка ресурса реакторного графита в ячейках системы управления и защиты с учетом деградации теплофизических свойств // Известия вузов. Серия: Ядерная энергетика. – 2005. – № 3. – С. 94–103.
4. Постов А.И. Метод расчета скорости выделения энергии Вигнера в задачах теплопроводности для облученного графита // Теплофизика высоких температур. – 2005 – Т. 43. – № 2. – С. 267–273.

Поступила 27.12.2006 г.