

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК: 621.039.532.21

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ
ВЫДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ВИГНЕРА В ОБЛУЧЕННОМ ГРАФИТЕ

©2025 г. А. О. Павлюк ^{a,b,*}, С. Г. Котляревский ^b, Е. В. Беспала ^{a,b},
Р. И. Кан ^b, Е. П. Зеленецкая ^{a,**}

^a *Национальный исследовательский Томский политехнический университет*
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 30

^b *Опытно-демонстрационный центр вывода из эксплуатации*
уран-графитовых ядерных реакторов
Россия, 636000, Северск, Томская обл., Автодорога, 13, стр. 179а

**e-mail: pavlyuk17@tpu.ru*

***e-mail: zeka@tpu.ru*

Поступила в редакцию 27.01.2025 г.

После доработки 12.04.2025 г.

Принята к публикации 22.04.2025 г.

Представлены методические подходы определения параметров отжига радиационных дефектов и, соответственно, выделения запасенной энергии (энергии Вигнера). Рассмотрены подходы по отбору проб графита из разных мест и элементов графитовых кладок промышленных уран-графитовых реакторов, а также устройство экспериментальной установки для дифференциально-термического анализа проб, позволившей получить спектры выделения энергии Вигнера графита и опробовать алгоритм их математической обработки для определения энергий активации.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всем мире накоплено около 250 000 т облученного реакторного графита [1]. Отмечается, что одной из проблем, имеющей значение при обосновании безопасности работ по выводу из эксплуатации ядерных реакторов с графитовым замедлителем, является накопленная под воздействием нейтронного излучения в реакторном графите запасенная энергия (энергия Вигнера) [1]. Опасность энергии Вигнера связана с тем, что при определенных условиях, зависящих от параметров облучения и условий отжига, она может выделяться спонтанно и приводить к разогреву графита выше температуры окисления

(выше 350°C), что соответственно влияет как на пожарную безопасность, так и радиационную, связанную с выходом радионуклидов.

К настоящему времени разработано много различных теорий, которые так или иначе описывают процессы дефектообразования и отжига [2–7]. С точки зрения их практического применения, для выполнения модельных расчетов разогрева графита при разных условиях обращения с облученным графитом наибольший интерес представляют теории, основанные на активационных моделях [4, 5, 7]. В соответствии с этими теориями процесс отжига радиационных дефектов определяется такими параметрами, как общее количество накопленной энергии, скорость выделения накопленной энергии, температура начала выделения и энергии активации. Целью настоящего исследования была разработка методических подходов по представительному отбору проб графита из промышленных уран-графитовых реакторов, разработка и изготовление экспериментальной установки термического анализа отобранных проб и определение основных параметров отжига радиационных дефектов согласно активационной модели. Ранее в РФ подход по определению параметров отжига был продемонстрирован только для определения запасенной энергии в графите ГР-280 (применяемого в реакторе РБМК), специально облученного в исследовательском реакторе БОР-60 до флюенса нейтронов $3.2 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$, в интервале температур облучения от 450–640°C до 1300°C [8]. В настоящей работе был выполнен кинетический анализ спектра запасенной энергии графита, включая определение энергий активации, что, в свою очередь, позволило определить виды радиационных дефектов в графите [8]. За рубежом определены энергии активации для исследовательского “низкотемпературного” реактора ВЕРО [6].

Необходимо отметить, что в целом подходы показали свою перспективность, но применение данных результатов [9–11] не представляется возможным для прогнозирования параметров отжига для промышленных реакторов РФ, так как параметры облучения графита в них индивидуальны, что приводит к необходимости выполнения отдельных оценок для каждого реактора.

2. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ И ВЫДЕЛЕНИЯ ЗАПАСЕННОЙ ЭНЕРГИИ В ГРАФИТЕ

Накопление энергии Вигнера обусловлено тем, что в кристаллической решетке графита под воздействием потока повреждающих нейтронов (энергия нейтронов более 180 кэВ) образуются разные радиационные дефекты (рис. 1а, б), которые различаются размером и конфигурацией. При этом в процессе роста дозы облучения происходит преобразование простых дефектов в более сложные (рис. 1а, б). При замедлении в графите повреждающего

нейтрона его энергии хватает для выбивания из узлов кристаллической решетки атомов, значительная часть которых не может преодолеть потенциальный барьер (рис. 1в) для выхода из метастабильного положения и располагается в решетке в виде внедрений, сохраняя некоторый избыток энергии по сравнению с равновесным атомом. Количество запасенной энергии возрастает с накоплением радиационных дефектов, что приводит к увеличению внутренней энергии. За счет повышения температуры выше температуры облучения графита на 40–80°С происходит преодоление потенциального барьера (рис. 1в, г) и в результате рекомбинации начинает происходить отжиг накопившихся дефектов и выделение запасенной энергии в виде тепла. При этом в процессе отжига дефектов также может происходить их преобразование в другие более сложные виды радиационных дефектов, которые отжигаются при более высокой температуре.

Рис. 1. Схемы дефектов

Энергетическая схема процесса отжига дефектов при выделении запасенной энергии (рис. 1в) показывает разность потенциальных энергий ядер в седловой точке и в исходном равновесном состоянии, которая является энергией активации. На рис. 1в отмечены три значения энергии активации ($E_a=0.8, 0.9, 1.8$ эВ), при которых происходит преодоление потенциального барьера дефектами разных видов. Величина накопления запасенной энергии определяется условиями облучения, включающими в основном температуру облучения и величину интегрального по времени потока нейтронов. Каждый вид дефектов отжигается при нагреве в определенной последовательности, характеризующейся энергией и температурой активации. Содержание энергии Вигнера может существенно различаться в зависимости от параметров и истории эксплуатации реакторов. Особенно это касается промышленных и исследовательских реакторов, в которых вариация таких параметров, как температура и плотность потока значительна.

В работах [4, 6] процесс отжига дефектов и выделения энергии Вигнера описывается следующим уравнением:

$$\frac{dH(E,T)}{dT} = -\frac{\nu}{a} H(E,T) \exp\left[-\frac{E}{kT}\right], \quad (1)$$

где $H(E,T)$ – запасенная энергия, E – энергия активации, ν – фактор частоты, k – постоянная Больцмана, T – температура отжига, a – скорость нагрева, $\nu = 4fn$, n – количество атомов и вакансий, формирующих деформацию (формоизменение), f – частота Дебая. При этом, как отмечается, энергетический спектр скорости выделения запасенной энергии $H(E, 0)$ соответствует распределению Гаусса [4].

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ

Для определения параметров отжига в графите УГР были разработаны методические подходы, включающие отбор проб графита из разных мест и элементов графитовых кладок остановленных промышленных реакторов, разработка и изготовление экспериментальной установки для дифференциально-термического анализа проб, позволившей получить спектры выделения энергии Вигнера графита и применить алгоритм их разложения на суперпозицию распределений Гаусса для определения энергий активации.

3.1. Методы отбора проб графита

В ходе исследований был проведен отбор проб графита (около 200 шт.) из графитовых элементов колонн, двух остановленных промышленных уран-графитовых реакторов (одного проточного и одного с замкнутым контуром) с водяным охлаждением (рис. 2а). Для получения наиболее полной информации о величине запасенной энергии, параметрах ее выделения был проведен отбор образцов путем выбуривания из разных мест и элементов (блоки и втулки) кладок реакторов (рис. 2б, в, г), что позволило получить образцы графита, облучавшиеся в диапазоне температур от 20 до 650 °С. Образцы графитовых втулок и ячеек графитовой кладки реактора были отобраны со сроком эксплуатации от 4 до 22 лет. Таким образом, отбор был выполнен для всего диапазона интегрального по времени потока повреждающих нейтронов и температуры облучения. Получаемая информация в зависимости от мест отбора представлена в табл. 1.

Рис. 2. Схема отбора и изготовления образцов из кернов...

Таблица 1. Информация о параметрах выделения энергии Вигнера в зависимости от мест отбора.

Места отбора образцов	Информация
Отбор из втулок и блоков по высоте кладки	Высотные распределения величины запасенной энергии
Отбор из самых “холодных” деталей кладки – верхних втулок	Температуры начала выделения запасенной энергии и ее максимальная величина
Отбор равномерно по толщине их стенок графитовых блоков	Распределения величины запасенной энергии и параметры ее выделения по горизонтальному сечению графитовых блоков

Отбор кернов диаметром 8 мм выполнялся при помощи полой фрезы из графитовых втулок (толщина стенок втулок в зависимости от реактора составляла 10 или 20 мм) после извлечения втулок из колонн кладки (рис. 2в). Отобранные цилиндрические керны из втулок

с толщиной стенки 20 мм каждый, распиливались на полувысоте на цилиндрические образцы длиной 10 мм в соответствии со схемой (рис. 2е). Каждая половинка притиралась на шлифовальной плите при помощи кондуктора до высоты 8 мм. Керны из втулок с толщиной стенки 10 мм не распиливались, а притирались на шлифовальной плите также до высоты 8 мм. Керны из графитовых блоков отбирались дистанционно непосредственно из кладки при помощи устройства горизонтального бурения (УГБ) [12]. Каждый отобранный по толщине стенки блока керн длиной около 60–70 мм (для разных реакторов длина керна различалась) распиливался на четыре части (рис. 2д), из полученных частей изготавливались образцы аналогично образцам из втулок.

3.2. Метод термического анализа проб графита

Для определения энергии Вигнера в графите был использован метод дифференциального термического анализа (ДТА), заключающийся в нагревании образцов с определенной скоростью с регистрацией в установленном температурном интервале временной зависимости градиента температур между образцом сравнения и исследуемым образцом.

Для реализации метода была изготовлена специальная установка дифференциального термического анализа графита ДТАГ (рис. 3), с помощью которой для отобранных графитовых образцов были определены интегральные величины и зависимости интенсивности выделения запасенной энергии от температуры отжига.

Рис. 3. Схемы экспериментальной установки для дифференциального термического анализа проб графита (ДТАГ)

Характеристики экспериментальной установки ДТАГ:

- масса измеряемых образцов и образцов сравнения в процессе измерений одинаковая и может быть от 0.5 до 3 г;
- форма образцов цилиндрическая, диаметр от 7 до 15 мм, а высота от 8 до 20 мм;
- в качестве образцов сравнения выбираются отожженные образцы графита, соответственно не содержащие запасенную энергию и обладающие той же теплопроводностью за счет облучения в схожих условиях, что и измеряемые образцы;
- рост температуры отжига линейный со скоростью 10–15 °С/мин до 800 °С;
- схема калориметра двухстеночная, позволяющая обеспечить выравнивание температурного поля по сечению рабочего объема калориметра;
- в качестве рабочей среды выбран технический вакуум (порядка 10^{-2} мм рт. ст.), позволяющий минимизировать неравномерности температурного поля под влиянием конвективных потоков.

Двухстеночная схема ДТАГ (рис. 3) позволила выравнять температурный градиент внутри калориметра для того, чтобы создать в объеме изотермическое пространство. Измеряемый образец 7 и два эталонных образца 12 устанавливались в калориметре на хромель-алюмелевые термопары 10. Спаи дифференциальной термопары плотно укреплялись внутри цилиндрических образцов одинаковых размеров, для чего в последних высверливалось осевое отверстие диаметром 1.3 мм и глубиной 4 мм. Концы дифференциальной термопары выводились из блока калориметра через трубчатые керамические изоляторы, расположенные на одинаковых расстояниях от оси калориметра. Являясь тепло- и электроизоляторами, керамические трубки позволяют фиксировать образцы в калориметре в одном и том же положении, что обуславливает хорошую воспроизводимость фона при проведении измерений. При определении запасенной энергии методом ДТА существенным является точность измерения термоэдс всех термопар и особенно термопары, измеряющей разность температур между измеряемым образцом и образцом сравнения. Термоэдс этой термопары измерялась двухкоординатным регистрирующим потенциометром ПДА-1 с минимальным масштабом 0.01 мВ/см.

К системе нагревания калориметров предъявлялись два требования – линейность нагревания и хорошая воспроизводимость линейного нагревания.

Система нагревания, применяемая в описываемой установке, обеспечивает нагревание калориметра с постоянной скоростью 12 °С в минуту в интервале температур от комнатной до 800 °С и позволяет воспроизводить нагревание с точностью ± 5 °С. Система нагревания состоит из электрической печи и источника питания. Электрическая печь представляет собой стальную трубу, на внешней поверхности которой уложена внешняя обмотка 5 нагревателя из нихрома, заизолированная от трубы слюдой 4. На уровне расположения образцов в трубе сделана радиальная проточка, в которую вложена внутренняя обмотка 3. Внешняя обмотка служит для начального разогрева печи до температуры 150 °С. Позже включается внутренняя обмотка, и нагрев идет до 800 °С. Причем внешняя обмотка сразу включается на полную мощность. Повышение мощности внутренней обмотки идет плавно. В качестве теплоизоляции применяется асбоцементный шнур 8.

Питание обмоток печи производится постоянным током. Химическое взаимодействие поверхности образцов в атмосфере калориметра, окисление спаев термопар и колебания температуры внутри калориметра из-за конвекционных потоков в процессе нагревания значительно влияют на величину и устойчивость фона. Для устранения этих недостатков в калориметре создается вакуум порядка 10^{-2} мм рт. ст.

Вакуумная система состоит из герметичного стеклянного колпака 2, находящегося на массивном стальном основании 13. Для герметизации разъемного соединения применяется

вакуумная резина. Вакуум в калориметре создавался форвакуумным насосом.

Основной целью при конструировании и эксплуатации калориметра являлось сведение к минимальной величине фона и его хорошая воспроизводимость. Причины появления фона могут быть следующие:

- химическое взаимодействие поверхности образцов с атмосферой в калориметре;
- неодинаковый теплообмен с окружающей средой;
- окисление спаев термопар и различие их теплового контакта с образцами;
- паразитные токи в цепях термопар.

Наличие вакуума уменьшает влияние первого и второго факторов. Стабилизация теплообмена образцов с окружающей средой достигается как за счет устранения конвекционного нагрева, так и за счет жесткого крепления образцов и их одинаковых размеров.

Для уменьшения третьей причины появления фона спаи термопар сваривались в аргоне и плотно подгонялись под отверстия в образцах. Измерения запасенной энергии в различных образцах проводились на одной и той же термопаре. Поэтому, если и существует паразитная термоэдс, то она равна при первом и втором нагревании и при вычитании исключается из численной величины запасенной энергии.

Воспроизводимость фона и его величина определяют чувствительность установки. При многократном нагревании двух одинаковых необлученных образцов было установлено, что точность воспроизведения фона от опыта к опыту обеспечивает возможность измерения теплового эффекта не меньше 10 кал/г.

На рис. 4а–в показаны термограммы трех последовательных нагреваний двух одинаковых образцов сравнения, демонстрирующих воспроизводимость фона: разность температур ($T_2 - T_1$) между отоженным (т.е. без запасенной энергии) образцом, расположенным на месте измеряемого γ (рис. 3), и образцом сравнения, разность температур ($T - T_1$) между образцом сравнения и стенкой калориметра, а также температуры стенки калориметра T при последовательных нагреваниях.

Рис. 4. Термограммы трех последовательных нагреваний двух одинаковых необлученных образцов...

Для определения энергии Вигнера проводилось два нагревания образцов (изменяемого и образца сравнения) и определилась разность температур ($T_2 - T_1$). Характерные спектры выделения запасенной энергии разных образцов, различающихся параметрами облучения, из графитовых деталей представлены на рис. 5. Определение начальной точки пересечения кривой удельной теплоемкости и кривой спектра выделения энергии в графитовых образцах имеет важное значение, так как данная точка определяет температуру начала $T_{нач}$.

самоподдерживающегося выделения энергии в графите. Как видно на рис. 5, для кривых, соответствующих двум образцам с относительно высоким содержанием энергии Вигнера, начало самоподдерживающегося выделения энергии в графите начинается при температурах $T_{нач.} \sim 120^\circ\text{C}$ и 180°C соответственно. Для трех других образцов отсутствие пересечения указывает на невозможность самоподдерживающегося выделения энергии в графите.

Рис. 5. Характерные спектры выделения запасенной энергии разных образцов из графитовых деталей.

Результаты исследований показали, что созданная в настоящей работе установка обладает достаточно широкой температурной областью измерения запасенной энергии, хорошей воспроизводимостью измерений и оптимальной чувствительностью, что позволило получить следующие параметры для применения метода ДТА:

- разности температур между измеряемым образцом и образцом сравнения ($T_2 - T_1$) пропорциональны разности термоэдс;
- разности температур между стенкой калориметра и образцом сравнения ($T - T_1$);
- температура стенки калориметра или термоэдс.

Анализ осуществляется, исходя из измеренных величин температур T_2 , T_1 и T . Как было отмечено выше, измерения проводились на образцах с малой массой, сопоставимой с массой конца термопары, который располагался внутри образца. Поэтому формула (1) преобразуется к следующему виду:

$$H = \int_{t_1}^{t_2} \frac{C_{эфф}(T_2 - T_1)}{T - T_1} dt, \quad (2)$$

где

$$C_{эфф} = \frac{m_{об}C_{об} + m_{mn}C_{mn}}{m_{об} + m_{mn}}, \quad (3)$$

m_{mn} – масса термопары, $m_{об}$ – масса образца, C_{mn} – теплоемкость термопары, $C_{об}$ – теплоемкость образца.

Как показал сравнительный анализ спектров выделения запасенной энергии полученных образцов из графитовых втулок (рис.6) и блоков (рис.7) с близкими параметрами облучения, несмотря на высокую точность измерения интегральных термических эффектов, стандартные системы – калориметры ДСК (типа DSC-404C или аналогичные) в определенных случаях имеют недостатки при определении динамических характеристик, таких как спектр выделения (рис. 6). Данный эффект замечен при сравнении спектров (рис. 6, 7), полученных на ДТАГ и на DSC-404C. Принцип проведения отжига на установках с определением зависимости интенсивности выделения запасенной энергии от температуры отжига и ее интегральной величины был одинаков для экспериментальной установки ДТАГ и DSC-404C, но, как видно, пики на спектрах, полученные на ДТАГ (рис. 6а, 7а) в отличие от

полученных с помощью DSC-404C (рис. 6б, 7б), более выражены, что указывает на лучшую разрешающую способность установки ДТАГ. При этом отчетливо видно более сильное влияние эффекта интерференции пиков (заштрихованные области графиков) на спектрах (рис. 6б, 7б), что существенно затрудняет возможность их идентификации и обработки с применением алгоритмов разделения.

Рис. 6. Спектры выделения (удельное энерговыделение запасенной энергии в зависимости от температуры отжига)

Рис. 7. Спектры выделения (удельное энерговыделение запасенной энергии в зависимости от температуры отжига)

В основном, данные различия обусловлены способом размещения образцов и регистрирующих термопар, размером образцов и используемой среды в рабочем объеме (рис.8), что существенно влияет на теплоотвод, амплитуду тепловых эффектов и, соответственно, на форму спектров.

Рис. 8. Схема расположения термопар относительно образцов графита в установках ДТАГ...

Как показано на рис. 8, в экспериментальной установке ДТАГ образец контактирует со спаем термопары, плотно установленным в отверстии, просверленном в образце. При этом спай термопары расположен в геометрическом центре образца, что позволяет снизить негативное влияние рассеяния тепловых эффектов в конструкциях камеры отжига на спектры выделения запасенной энергии. В DSC-404C или аналогичных системах образец располагается на дне тигля или основания для тигля, что делает термический эффект на DSC-404C более инерционным по времени его нарастания и затухания, что снижает амплитуду пиков на спектрах из-за отвода выделяющегося в образце тепла в массу тигля. При этом могут иметь место искажения из-за зазоров в области контакта образца с тиглем и тигля с основанием.

Кроме различий в схеме расположения термопар относительно образцов графита в установках ДТАГ и DSC-404C (рис.8), влияние на спектры выделения запасенной энергии также могут оказывать среда рабочего объема, скорость разогрева и размер образцов. Так, в качестве среды в рабочем объеме установки DSC-404C использовался гелий, а в установке ДТАГ – вакуум. Для экспериментов по отжигу применение вакуума в качестве среды позволяет повысить качество получаемых спектров за счет снижения теплоотвода от образца в среду камеры. Скорость подъема температуры в термокамере в установке DSC-404C составляла около 5 °С/мин, в экспериментальной установке ДТАГ – примерно 12 °С/мин. Различия в скоростях нагрева 5 °С/мин незначительные, но при этом отмечается [4], что чем ниже скорость нагрева, тем меньше влияние негативных динамических эффектов на спектр.

Образцы в экспериментальной установке ДТАГ имели диаметр и высоту 8 мм, в DSC-404C – диаметр 6 мм и высоту 5 мм. Влияние размеров образцов на спектр обусловлено возможным температурным градиентом в случае применения достаточно большого образца (более 12 мм), так как нагрев начинается с наружных поверхностей и далее идет к центру образца. С другой стороны, в случае небольшого образца эффект выделения может быть недостаточно заметен из-за рассеяния тепловыделения в тигле, основании, термопаре, а также теплоотвода в среду при отсутствии вакуума.

3.3. Методы определения энергии активации

Для определения энергий активации разных дефектов, образовавшихся в образце, в рамках настоящей работы было выполнено разложение экспериментальных спектров на отдельные пики (рис. 9а, б). Как видно, полученные на установке ДТАГ спектры выделения энергии Вигнера имеют достаточное разрешение для определения суперпозиции (наложения) отдельных пиков, каждый из которых относится к отжигу определенного вида дефектов со свойственной ему энергией активации (рис. 1).

Рис. 9. Примеры разложения спектров выделения энергии Вигнера на отдельные одиночные распределения Гаусса

Разложение каждого спектра (рис. 9а, б) на отдельные его составляющие осуществлено методом наименьших квадратов с помощью распределений Гаусса следующего вида:

$$N_{\max} = y_0 + \frac{A}{\sigma\sqrt{\pi/2}} \cdot \exp\left[-2\left((h - h_0)/\sigma\right)^2\right], \quad (4)$$

где N_{\max} – число отсчетов в максимуме, y_0 – уровень фона, A – амплитуда, h_0 – среднее значение, σ^2 – дисперсия, которая определяются программой в процессе расчета, и соответствует ширине распределения энергии активации.

В результате были определены величины энергии активации для определенных температур максимумов пиков полученных спектров (пример на рис. 9а, б) для образцов, облучавшихся при разных температурах и, соответственно, отличающихся между собой как содержанием величины энергии Вигнера, так и температурой начала ее выделения.

Для спектра №1 (рис. 9а) для первого пика получаем $T_{\max} \sim 241^\circ\text{C}$, $E_a=1.6$ эВ; для второго – $T_{\max} \sim 352^\circ\text{C}$, $E_a=1.9$ эВ; для третьего – $T_{\max} \sim 454^\circ\text{C}$, $E_a=2.25$ эВ; для четвертого – $T_{\max} \sim 509\text{--}628^\circ\text{C}$, $E_a \sim 2.6$ эВ; для пятого – $T_{\max} \sim 695\text{--}731^\circ\text{C}$, $E_a \sim 2.95$ эВ. Для спектра №2 (рис. 9б) получились те же значения, кроме первого пика, соответствующего $T_{\max} \sim 241^\circ\text{C}$, что связано с различием в температуре облучения образцов №1 и №2 приблизительно на 50–100 °C (видно по температуре начала выделения запасенной энергии).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали результаты, методические подходы к определению параметров отжига радиационных дефектов и, соответственно, выделения запасенной энергии, примененные для анализа конечного состояния графита ПУГР, показали свою надежность и могут быть адаптированы для УГР других типов (РБМК, ЭГП-6 и др.).

Экспериментальная установка ДТАГ позволяет снизить негативное влияние рассеяния тепловых эффектов в конструкциях камеры отжига на спектры выделения запасенной энергии. В результате достаточное разрешение отдельных пиков интенсивностей энерговыделения на кривых отжига позволяет применять алгоритмы разложения и, соответственно, проводить определение величин энергии активации дефектов.

В качестве направления продолжения исследований актуально применение других способов математической обработки спектров выделения энергии Вигнера с целью определения вариации получаемых величин энергии активации. Величины энергии активации дефектов в значительной степени определяют точность при математическом моделировании термических эффектов отжига запасенной энергии в различных условиях при решении вопросов безопасности обращения с облученным графитом.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа частично выполнена в рамках программы Приоритет 2030 (проект № Приоритет-2030-НИП/ЭБ-039-375-2023)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wickham A., Steinmetz H.J., O'Sullivan P., Ojovan M.I.* // J. Environ. Radioact. 2017. V. 171. P. 34. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.01.022>
2. *Telling R.H., Heggie M.I.* // Philos. Mag. 2007. V. 87. P. 797. <https://doi.org/10.1080/14786430701210023>
3. *Нестеров В.Н., Шаманин И.В., Емец Е.Г., Цыганов А.А., Котляревский С.Г., Павлюк А.О.* // Изв. ВУЗов. Ядерная энергетика. 2008. № 1. С. 120.
4. *Iwata T.* // J. Nucl. Mater. 1985. V. 133–134. P. 361. [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(85\)90168-0](https://doi.org/10.1016/0022-3115(85)90168-0)
5. *Kelly B.T.* // UKAEA Report NRL-R-2028(S), 1989.
6. *Lasithiotakis M., Marsden B.J., Marrow T.J.* // J. Nucl. Mater. 2012. V. 427. P. 95. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2008.07.039>

7. *Vand V.* // Proc. Royal Society. London. 1945. V. 55. P. 222.
<https://doi.org/10.1088/0959-5309/55/3/308>
8. *Белан Е.П., Харьков Д.В., Авдонин А.В.* // Атомная энергия. 2018. Т. 125. № 3. С. 172.
9. *Bespala E.V., Pavliuk A.O., Kotlyarevskiy S.G.* // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2015. V. 93. P. 012065. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/93/1/012065>
10. *Pavliuk A.O., Kotlyarevskiy S.G., Bespala E.V., Novoselov I.Y.* // J. Nuclear Mater. V. 515. P. 303. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.12.044>
11. *Pavliuk A.O., Kotlyarevskiy S.G., Bespala E.V., Kotov V.N., Novoselov I.Y.* // Sci. Technol. Nucl. Install. 2022. № 1. <https://doi.org/10.1155/2022/2957310>
12. *Комаров Е.А., Павлюк А.О., Котляревский С.Г., Шевченко А.О., Шевченко О.М.* РФ Патент 2378510, 2010.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схемы дефектов: **а, б** – схемы образования разных дефектов в зависимости от роста дозы облучения, **в** – энергетическая схема отжига дефектов в процессе выделения, **г** – зависимость между энергией активации и температурой отжига дефектов.
- Рис. 2.** Схема отбора и изготовления образцов из кернов, отобранных из блоков и втулок графитовой кладки: **а** – графитовые колонны, **б** – графитовый блок со втулкой, **в** – извлеченные графитовые втулки, **г** – внутренняя поверхность графитового блока после отбора кернов, **д** – керна и образцы из блоков, **е** – керна и образцы из втулок, **1** – отметки отбора кернов по высоте колонны, **2** – керны, **3** – образцы из кернов.
- Рис. 3.** Схемы экспериментальной установки для дифференциального термического анализа проб графита (ДТАГ): **1** – крышка калориметра, **2** – стеклянный колпак, **3** – внутренняя обмотка нагревателя, **4** – внешняя обмотка нагревателя, **5** – электроизоляция (слюда), **6** – внутренняя стенка калориметра, **7** – измеряемый образец, **8** – теплоизоляция (асботкань), **9** – дно калориметра (нерж. сталь), **10** – термопары, **11** – внешняя стенка калориметра, **12** – образцы сравнения, **13** – стальное основание.
- Рис. 4.** Термограммы трех последовательных нагреваний двух одинаковых необлученных образцов: **а** – разность температур ($T_2 - T_1$) между отоженным (т.е. без запасенной энергии) измеряемым образцом и образцом сравнения в процессе трех последовательных отжигов, **б** – разность температур ($T - T_1$) между образцом сравнения и стенкой калориметра в процессе трех последовательных отжигов, **в** – зависимость температуры стенки T от времени при проведении трех последовательных отжигов.
- Рис. 5.** Характерные спектры выделения запасенной энергии разных образцов из графитовых деталей.
- Рис. 6.** Спектры выделения (удельное энерговыделение запасенной энергии в зависимости от температуры отжига) для графитовых втулок с близкими параметрами облучения, полученные на установках: **а** – ДТАГ, **б** – DSC-404C, **1–5** – пики, соответствующие распределениям Гаусса.
- Рис. 7.** Спектры выделения (удельное энерговыделение запасенной энергии в зависимости от температуры отжига) для графитовых блоков с близкими параметрами облучения, полученные на установках: **а** – ДТАГ, **б** – DSC-404C, **1–4** – пики, соответствующие распределениям Гаусса.

Рис. 8. Схема расположения термопар относительно образцов графита в установках ДТАГ (а) и DSC-404С (б): 1 – образец графита, 2 – направления тепловых потоков при выделении энергии, 3 – спай термопар, 4 – изоляторы, 5 – крышка тигля, 6 – тигель, 7 – основание для установки термопары.

Рис. 9. Примеры разложения спектров выделения энергии Вигнера на отдельные одиночные распределения Гаусса: а – спектр №1, б – спектр №2, 1 – экспериментальное распределение, 2 – расчетное распределение, 3 – распределение Гаусса.

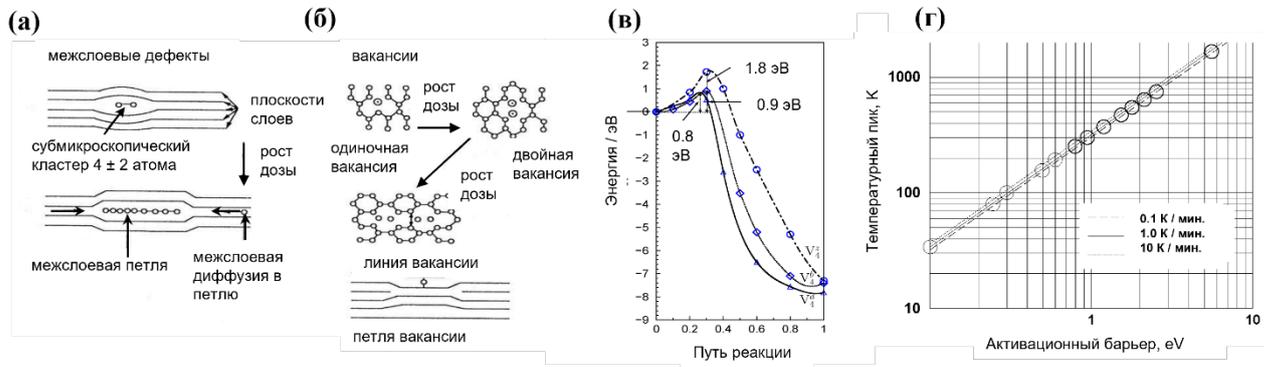


Рис. 1.

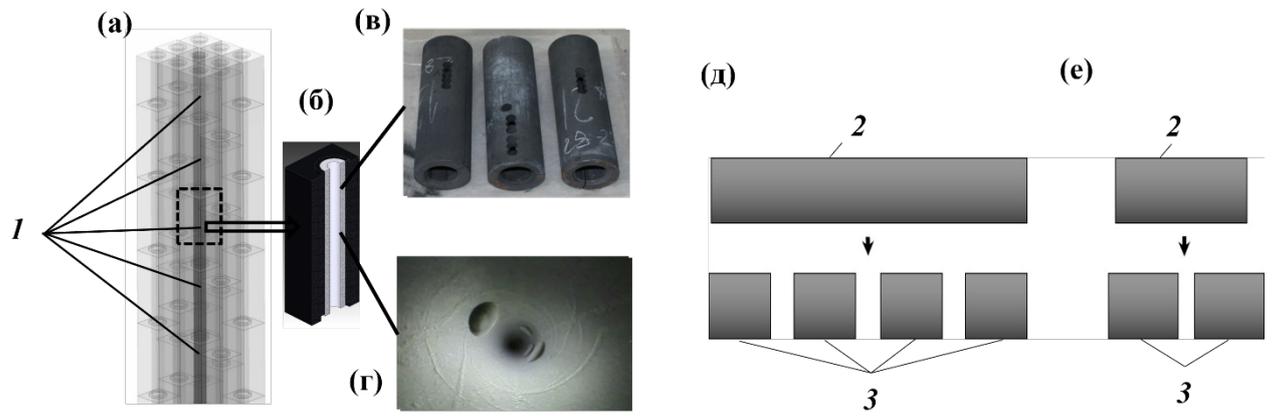


Рис. 2.

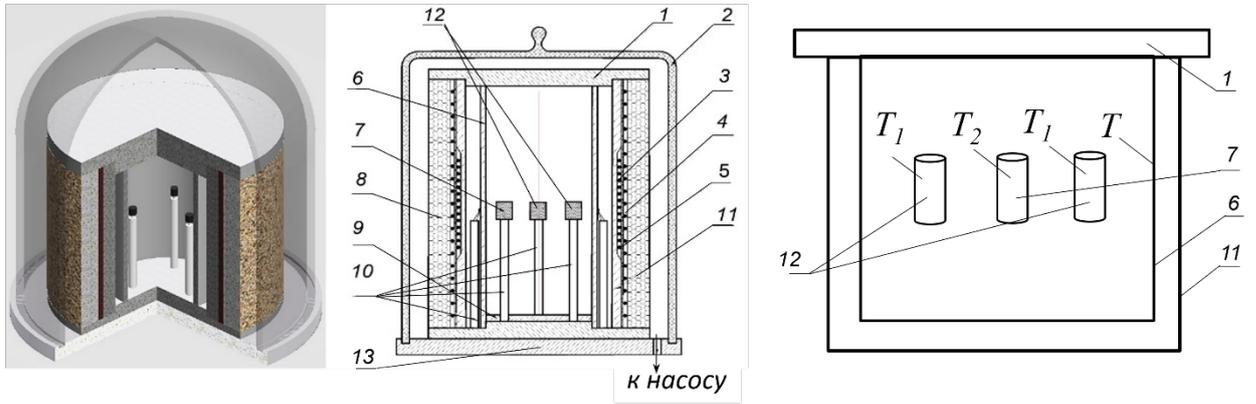
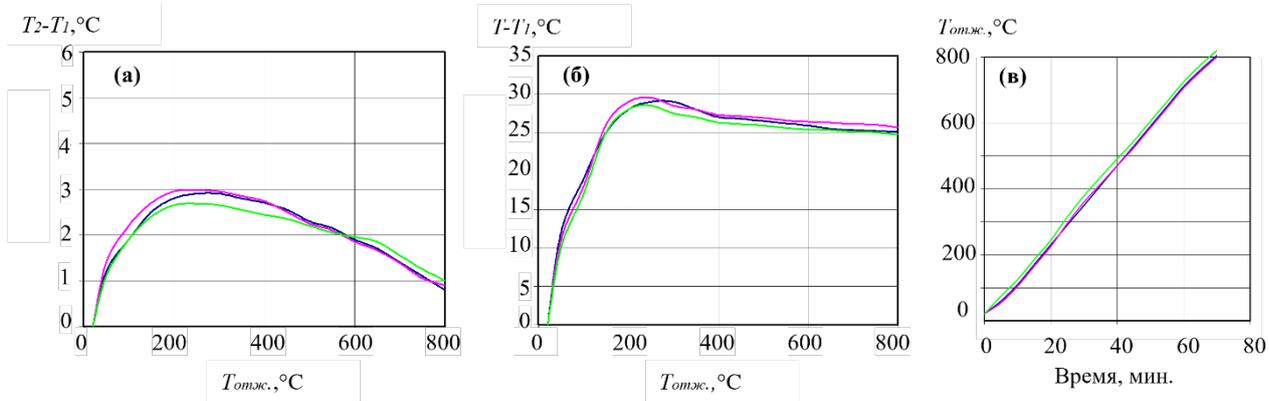
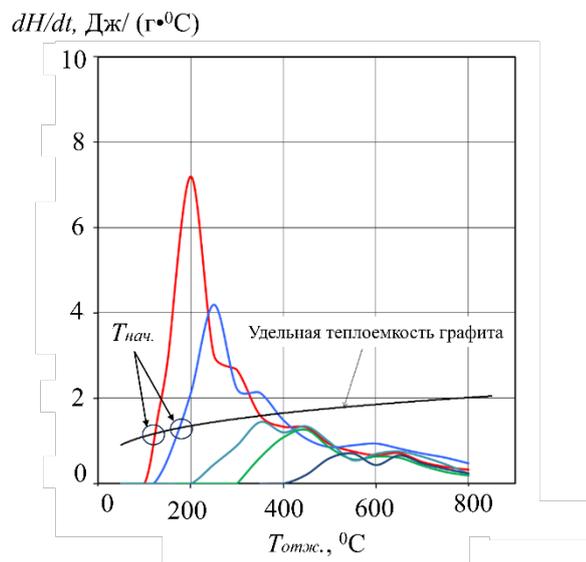


Рис. 3.



убрать сетку, засечки оставить

Рис. 4.



убрать сетку
засечки оставить

Рис. 5.

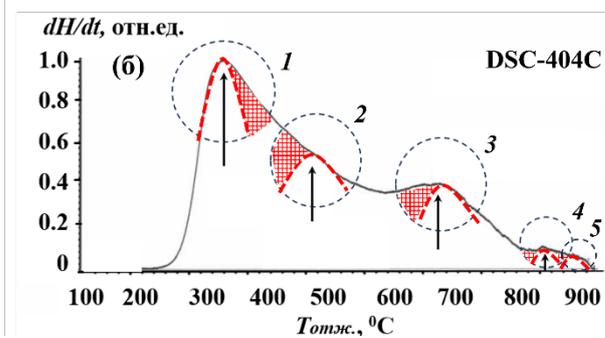
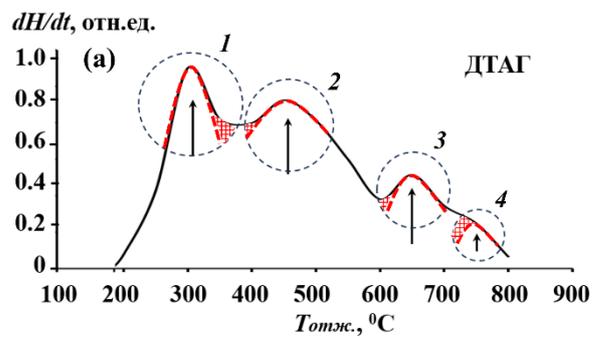


Рис. 6.

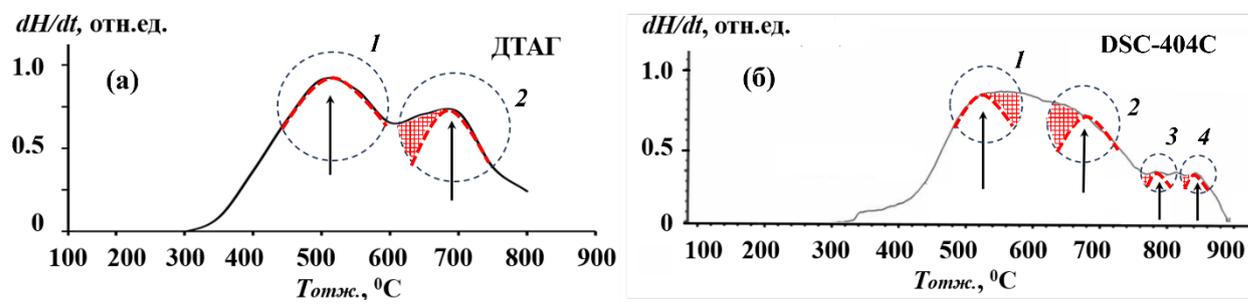


Рис. 7.

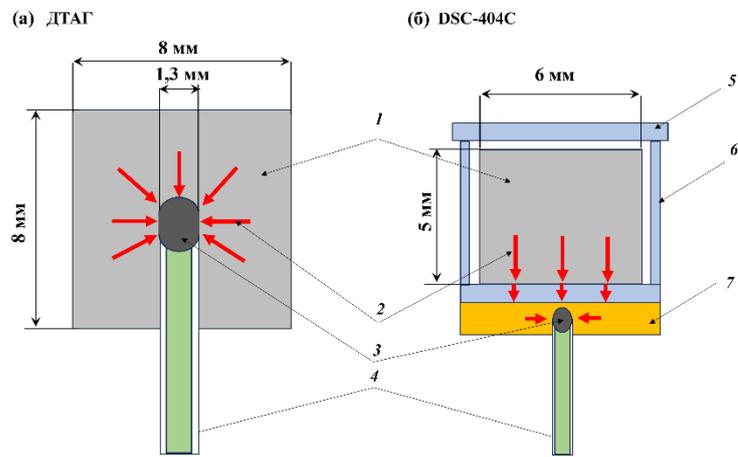


Рис. 8.

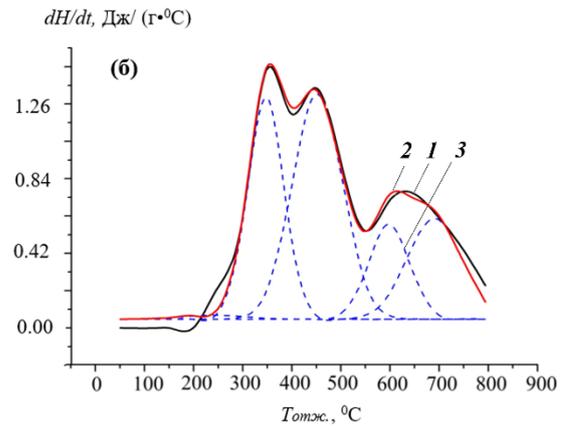
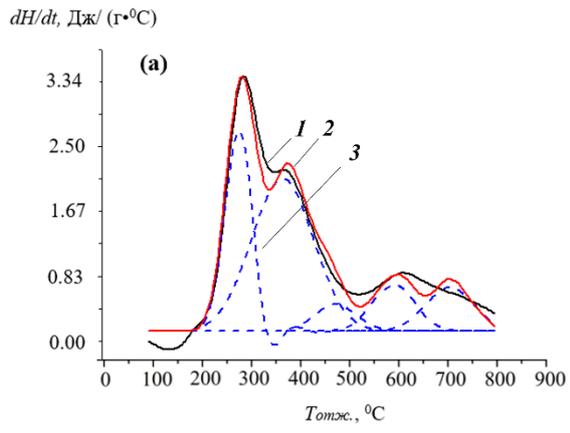


Рис. 9.