

На правах рукописи

Белан Елена Павловна

**ЗАПАСЁННАЯ ЭНЕРГИЯ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ГРАФИТА
ГР-280, ОБЛУЧЁННОГО ДО ВЫСОКИХ ФЛЮЕНСОВ НЕЙТРОНОВ**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Ульяновск, 2017 г.

Работа выполнена на кафедре радиационных технологий ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации и в лаборатории исследований топливных материалов и элементов перспективных реакторов отделения реакторного материаловедения Акционерного общества «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (АО «ГНЦ НИИАР»)

Научный руководитель: **Покровский Александр Сергеевич**
кандидат физико-математических наук

Официальные оппоненты: **Чернов Иван Ильич**
доктор физико-математических наук, профессор,
Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт», кафедра физических проблем материаловедения, профессор кафедры
Шаманин Игорь Владимирович
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», научная лаборатория изотопного анализа и технологий инженерной школы ядерных технологий, заведующий лабораторией

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Защита диссертации состоится «16» февраля 2018 г. в 12 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.278.01 при ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет» по адресу: г. Ульяновск, ул. Набережная реки Свияги, д. 106, к. 1, ауд. 703.

С диссертацией и авторефератом диссертации можно ознакомиться в научной библиотеке Ульяновского государственного университета и на сайте ВУЗа <http://www.ulsu.ru>, а так же с авторефератом можно ознакомиться на сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки РФ – <http://vak.ed.gov.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Отзывы на автореферат просим высылать по адресу: 432017, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, д. 42, УлГУ, Отдел подготовки кадров высшей квалификации.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.ф-м.н.

Вострцова Л.Н.

Общая характеристика работы

Актуальность

Графит ГР-280 используется в реакторах большой мощности канального типа (РБМК) в качестве материала кладки, которая выполняет функцию основного конструкционного элемента активной зоны, замедлителя и отражателя нейтронов.

К настоящему времени кладка большинства реакторов РБМК выработала назначенный тридцатилетний ресурс. Однако результаты проведённых исследований указали на потенциальную возможность её дальнейшей эксплуатации. В связи с этим концерн «Росэнергоатом» в рамках общей целевой программы Минатома РФ по обоснованию предельно достижимого срока службы графитовых кладок реакторов РБМК поставил задачу расчёта напряженно-деформированного состояния блоков графита ГР-280, облучённого до предельного флюенса нейтронов около $3 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$ (здесь и далее для $E > 0,18 \text{ МэВ}$) в рабочем интервале температуры кладки $450 \div 650 \text{ }^\circ\text{C}$ [1].

При расчёте напряженно-деформированного состояния кладки одним из основных параметров, определяющих как радиационные, так и термические напряжения, возникающие в графитовых блоках при их эксплуатации, является теплопроводность графита. Теплопроводность графита ГР-280, облучённого при $450 \div 650 \text{ }^\circ\text{C}$ до флюенса нейтронов порядка 10^{26} м^{-2} , изучена сравнительно слабо. Из-за сложности высокотемпературных измерений коэффициент теплопроводности определяли в основном при комнатной температуре, данные для рабочих условий графитовой кладки и нештатных ситуаций, сопровождающихся перегревом активной зоны, получали, как правило, методом экстраполяции, что снижает их достоверность.

При нештатных перегревах активной зоны, а также при выборе оптимальных способов и методов обращения с накопленными радиоактивными отходами, среди которых отработанный графит занимает одно из основных мест, немаловажную роль играет уровень запасённой энергии в графитовой кладке.

Вопрос накопления запасённой энергии в графитовых элементах активной зоны уран-графитовых реакторов и характеристик её выхода в последнее время широко обсуждается в печати [2, 3, 4, 5, 6].

Большинство имеющихся в настоящий момент экспериментальных данных по запасённой энергии в графите относятся к температурам облучения, не превышающим $150 \div 200 \text{ }^\circ\text{C}$, и флюенсу нейтронов не более $2 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-2}$. В ряде обзорных работ [4, 5, 6] были предприняты попытки спрогнозировать уровень запасённой энергии в графите, облучённом при высоких температурах, и сделан

вывод, что для однозначного решения проблемы необходимы дополнительные экспериментальные исследования.

Таким образом, исследования теплопроводности графита ГР-280, облучённого при $450 \div 650$ °С до флюенса нейтронов порядка 10^{26} м⁻², и запасённой в нём энергии являются актуальными.

Цели и задачи

Целью работы является определение запасённой энергии в графитовых элементах кладки реактора РБМК и их теплопроводности в области высокой температуры измерения, соответствующей условиям нормальной эксплуатации кладки реактора и нештатных ситуаций, связанных с перегревом активной зоны.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить **следующие задачи**.

1. Получить экспериментальные данные по общей запасённой энергии и скорости её выхода при отжиге графита, облучённого при $450 \div 650$ °С до флюенса нейтронов $3,2 \cdot 10^{26}$ м⁻², в интервале от температуры облучения ($T_{\text{обл}}$) до 1300 °С.

2. Выполнить кинетический анализ спектра запасённой энергии графита, облучённого при 450 °С до флюенса нейтронов $3,2 \cdot 10^{26}$ м⁻², в интервале от $T_{\text{обл}}$ до 1300 °С, определить энергии активации и тип радиационных дефектов в данном графите.

3. Получить экспериментальные данные по коэффициенту теплопроводности графита, облучённого при $450 \div 650$ °С до флюенса $3,2 \cdot 10^{26}$ м⁻², в интервале температуры $20 \div 1200$ °С, построить аналитическую зависимость коэффициента теплопроводности от температуры облучения и флюенса нейтронов в области высоких флюенсов нейтронов.

4. Провести высокотемпературный отжиг графита, облучённого при $450 \div 650$ °С до флюенса нейтронов $1,5 \cdot 10^{26}$ м⁻², и выполнить оценку его влияния на теплопроводность данного графита.

Научная новизна

1. Получены новые экспериментальные данные по уровню накопления и скорости выхода запасённой энергии из графита, облучённого при $450 \div 640$ °С до флюенса нейтронов $3,2 \cdot 10^{26}$ м⁻², в интервале от температуры облучения до 1300 °С.

2. Определены энергии активации и тип радиационных дефектов в графите, облучённом при 450 °С до флюенса нейтронов $3,2 \cdot 10^{26}$ м⁻².

3. Впервые получены экспериментальные данные по коэффициенту теплопроводности графита ГР-280, облучённого при $450 \div 640$ °С до флюенса нейтронов $3,2 \cdot 10^{26}$ м⁻², в интервале температуры измерения $25 \div 1200$ °С и построена аналитическая зависимость коэффициента теплопроводности графита

ГР-280 от температуры облучения и флюенса нейтронов в области критических¹ и закритических флюенсов нейтронов в диапазоне температуры облучения 450 ÷ 800 °С, учитывающая образование микротрещин в графите вследствие облучения.

4. Выявлено влияние высокотемпературного отжига на коэффициент теплопроводности графита ГР-280, облучённого при 450 ÷ 640 °С до флюенса нейтронов $1,5 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Экспериментальные данные по теплопроводности графита ГР-280, облучённого до высокого флюенса нейтронов при 450 ÷ 650 °С, в области высоких температур измерения, а также по выходу запасённой энергии значительно расширяют существующую базу данных по радиационной стойкости реакторного графита.

2. Использование экспериментальных значений теплопроводности графита ГР-280, облучённого до высокого флюенса нейтронов при температуре 450 ÷ 650 °С, при высоких температурах измерения, а также зависимости коэффициента теплопроводности графита ГР-280 от температуры облучения и флюенса нейтронов позволяет увеличить точность расчетов напряженно-деформированного состояния кладок реакторов РБМК в условиях повышенных рабочих температур, имеющих место при длительных сроках эксплуатации, и в нештатных ситуациях, сопровождающихся перегревом активной зоны.

3. Данные по выходу запасённой энергии из графита, облучённого до высокого флюенса нейтронов при температуре 450 ÷ 650 °С, могут быть использованы при прогнозировании поведения и лицензировании графитовых элементов активных зон действующих и разрабатываемых высокотемпературных газовых реакторов.

4. Спектр запасённой энергии графита, облучённого до высокого флюенса нейтронов, и рассчитанные по нему энергии активации процессов отжига вносят существенный вклад в развитие теоретических моделей радиационного дефектообразования в реакторном графите.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов обоснована применением аттестованных методик измерения, материаловедческих исследовательских установок, воспроизводимостью экспериментальных данных и согласованностью результатов с опубликованными литературными данными.

¹ Флюенс нейтронов, при котором графит после стадии усадки возвращается к исходным размерам, затем наступает стадия распухания

Основные положения, выносимые на защиту

1. Нагревание графита ГР-280, облучённого при температуре $450 \div 640$ °С, от $T_{\text{обл}}$ до 1300 °С приводит к выделению до 200 Дж/г запасённой энергии. Максимальная скорость выхода запасённой энергии наблюдается при температуре послерадиационного отжига 1100 °С.

2. В графите, облучённом при температуре 450 °С до флюенса нейтронов $3,2 \cdot 10^{26}$ м⁻², в интервале от $T_{\text{обл}}$ до 1300 °С происходит отжиг радиационных дефектов с энергиями активации $1,95 \div 4,03$ эВ, которые соответствуют энергиям миграции моно- и дивакансий и эволюции кластерной структуры.

3. Аналитическая зависимость коэффициента теплопроводности от параметров облучения, полученная из корреляции теплопроводности и вторичного набухания графита под действием облучения, позволяет рассчитывать теплопроводность графита ГР-280 в области критических и закритических флюенсов нейтронов в диапазоне $T_{\text{обл}} = 450 \div 800$ °С.

4. Под действием отжига при температуре 1200 °С в течение 2 ч. теплопроводность графита ГР-280, облучённого при $T_{\text{обл}} = 450 \div 640$ °С до флюенса нейтронов $(0,5 \div 1,5) \cdot 10^{26}$ м⁻², увеличивается приблизительно в 2 раза.

Личный вклад

Автор совместно с научным руководителем выполняла постановку цели и задач, участвовала в усовершенствовании и отработке методик послереакторных исследований облучённого графита. Автор самостоятельно получила основную, определяющую часть экспериментальных результатов и выполнила анализ данных.

Апробация работы

Часть диссертационной работы выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00277.

Основные результаты работы были доложены на десятой Российской конференции по реакторному материаловедению ($27 \div 31$ мая 2013 г., г. Димитровград), на седьмой Научной конференции молодых сотрудников АО «ГНЦ НИИАР» ($24 \div 28$ февраля 2014 г., г. Димитровград), на второй Всероссийской молодежной научно-технической конференции с международным участием «Инновации в материаловедении» (РАН, $01 \div 04$ июня 2015 г., г. Москва), на XII Международном Уральском Семинаре «Радиационная физика металлов и сплавов» (с 26 февраля по 3 марта 2017 г., г. Кыштым), на Всероссийской молодежной конференции «Научные исследования и технологические разработки в обеспечение развития ядерных технологий нового поколения» ($05 \div 07$ апреля 2016 г., г. Димитровград).

Публикации

По материалам диссертации в различных изданиях опубликовано 9 печатных работ, в том числе три в издании из Перечня ВАК.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы. Диссертация изложена на 95 страницах, содержит 48 рисунков, 6 таблиц, список литературы из 60 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ литературы, посвящённой влиянию нейтронного облучения на структуру и свойства реакторного графита.

Представлено описание технологии изготовления, структуры и свойств графита ГР-280, приведены характеристики и условия эксплуатации кладки реакторов РБМК, материалом которой служит графит ГР-280. Рассмотрены вопросы радиационного повреждения структуры реакторного графита и накопления в нём запасённой энергии, а также закономерности изменения теплопроводности графита под действием нейтронного облучения и последующего за ним термического отжига.

Анализ литературы показал, что теплопроводность графита ГР-280, облучённого до флюенса нейтронов порядка 10^{26} м^{-2} при температуре $450 \div 650 \text{ }^\circ\text{C}$, характерной для эксплуатации графитовой кладки реактора РБМК, изучена сравнительно слабо. Коэффициент теплопроводности графита, облучённого при таких параметрах, измеряли, в основном, при комнатной температуре, значения коэффициента теплопроводности при температуре облучения и выше были получены методом экстраполяции.

Запасённую энергию в реакторном графите интенсивно изучали в пятидесятых - семидесятых годах прошлого столетия. Подавляющая часть работ была посвящена исследованию графита, облучённого при низкой температуре до флюенса нейтронов, не превышающего $0,2 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$. Исследования запасённой энергии в графите, облучённом при температуре $500 \div 700 \text{ }^\circ\text{C}$ до флюенса нейтронов порядка 10^{26} м^{-2} , не проводились.

Сделано заключение, что имеющийся в настоящее время объем экспериментальных данных по влиянию нейтронного облучения и последующего за ним термического отжига на теплопроводность графита ГР-280 и величину запасённой в нём энергии недостаточен для надёжного прогнозирования поведения кладки реакторов РБМК в условиях нормальной эксплуатации и нештатных ситуаций, сопровождающихся перегревом активной зоны. В связи с этим возникает необходимость провести исследования теплопроводности графита ГР-280,

облучённого до флюенса нейтронов порядка 10^{26} м^{-2} при температуре $450 \div 650 \text{ }^\circ\text{C}$, в области высокой температуры измерения и экспериментально определить величину запасённой в нём энергии.

Во второй главе приведены характеристики исследуемых образцов, описаны методики реакторных испытаний и послереакторных материаловедческих исследований.

Образцы для реакторных испытаний представляли собой цилиндры размером $\varnothing 8 \times 30 \text{ мм}$, вырезанные вдоль оси формования стандартных графитовых блоков, предназначенных для использования в реакторах РБМК.

Образцы облучали в ячейках 4-го ряда активной зоны реактора БОР-60, где плотность потока нейтронов составляет $1,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ($E_n > 0,18 \text{ МэВ}$), в специально разработанных облучательных устройствах (ОУ). Было изготовлено три типа ОУ: БГ-5, БГ-6 и БГ-7, расчётные температуры облучения которых составляли соответственно 450 ± 25 , 550 ± 25 и $650 \pm 25 \text{ }^\circ\text{C}$. Облучение происходило поэтапно. Интервалы набранного образцами флюенса нейтронов составили $(0,5 \div 3,3) \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$, $(0,5 \div 3,2) \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$ и $(0,5 \div 2,1) \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$ для ОУ БГ-5, БГ-6 и БГ-7 соответственно.

Флюенс нейтронов определяли по наведенной активности мониторов из ^{54}Fe и ^{93}Nb с погрешностью 10 %, температуру облучения образцов – по мониторам из SiC со среднеквадратическим отклонением, не превышавшим $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Средняя температура облучения составила 450 , 560 и $640 \text{ }^\circ\text{C}$ для образцов из ОУ БГ-5, 6 и 7 соответственно.

Послереакторные материаловедческие исследования включали в себя определение запасённой энергии и коэффициента теплопроводности графита.

Коэффициент теплопроводности определяли методом лазерной вспышки с погрешностью не более 5 %, запасённую энергию – методом дифференциальной сканирующей калориметрии с погрешностью не более 3,5 %.

Для измерения коэффициента теплопроводности и запасённой энергии использовали образцы в форме дисков размером $\varnothing 8 \times 5 \text{ мм}$ и $\varnothing 6 \times 2 \text{ мм}$ соответственно, вырезанные механическим и электроэрозионным путем из облучённых цилиндрических образцов размером $\varnothing 8 \times 30 \text{ мм}$.

Все использованные методики стандартны, все исследовательские установки аттестованы.

В третьей главе представлены результаты исследований запасённой энергии в графите.

Характер выхода запасённой энергии при отжиге образцов, облучённых до флюенса нейтронов $(0,5 \div 3,2) \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$ при температурах $450 \text{ }^\circ\text{C}$ и $640 \text{ }^\circ\text{C}$,

продемонстрирован на рисунке 1. Образцы отжигали в динамическом режиме в интервале температуры $400 \div 1300$ °С с постоянной скоростью нагрева 20 °/мин.

Как видно из рис. 1, выделение запасённой энергии начинается уже при температуре, близкой к температуре облучения.

У образцов, облучённых при 450 °С (рис. 1 а), скорость выхода запасённой энергии (dS/dT) в диапазоне $500 \div 950$ °С медленно увеличивается от 0 до $0,15$ Дж/(г·К), затем за короткий интервал температуры поднимается до максимального значения $0,40 \div 0,48$ Дж/(г·К), после чего (при температуре выше 1100 °С) быстро спадает. На начальном участке (в интервале температуры $500 \div 950$ °С) скорость выхода запасённой энергии увеличивается с увеличением флюенса нейтронов, а при температуре 1100 °С – уменьшается.

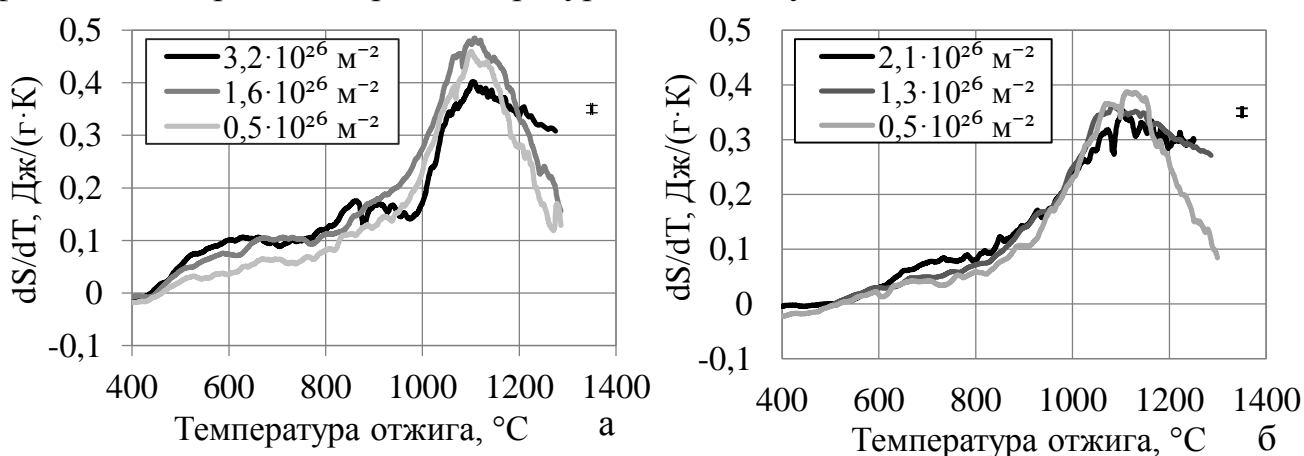


Рисунок 1 – Зависимость скорости выхода запасённой энергии от температуры отжига образцов, облучённых при 450 °С (а) и 640 °С (б)

Зависимости скорости выхода запасённой энергии от температуры отжига ($dS/dT(T)$) образцов, облучённых при 450 °С и 640 °С, аналогичны (рис. 1 а и 1 б), однако абсолютное значение скорости выхода запасённой энергии у образцов, облучённых при 640 °С, во всем интервале температуры отжига приблизительно на 20 % ниже, чем у образцов, облучённых при 450 °С.

Следует отметить, что даже на участке медленного увеличения скорости выхода запасённой энергии ($500 \div 950$ °С), зависимость $dS/dT(T)$ имеет немонотонный характер – график $dS/dT(T)$ представляет собой череду пиков, а в интервале резкого увеличения скорости выхода запасённой энергии (950 °С \div 1100 °С) на кривой зависимости $dS/dT(T)$ просматриваются, как правило, характерные ступени.

Выделение энергии при нагреве образцов выше температуры облучения, как известно, является следствием термического отжига радиационных дефектов – дефекты аннигилируют, исчезают на границах зёрен, образуют скопления и т.д.,

при этом доля свободной энергии, приходящаяся на один атом кристаллической решётки, уменьшается, а избыточная энергия выделяется в виде тепла [6, 7].

Исследуемый графит облучён до высокого флюенса нейтронов, поэтому можно предположить, что в его кристаллической решётке содержится серия радиационных дефектов, различающихся размером и конфигурацией. Учитывая, что каждый тип дефектов отжигается на строго определенной стадии, характеризующейся своей энергией и температурой активации, пики, наблюдаемые на экспериментальных кривых $dS/dT(T)$, демонстрируют, по всей видимости, стадии отжига, связанные с преобразованием разных типов радиационных дефектов.

Снижение скорости выхода запасённой энергии с увеличением температуры облучения является, по всей видимости, следствием термического отжига радиационных дефектов в процессе облучения. Различное влияние флюенса нейтронов на величину dS/dT в разных интервалах температуры отжига можно объяснить противодействием при облучении двух процессов: накопления радиационных дефектов и их радиационного отжига.

Общая запасённая энергия. Общую запасённую энергию (S), выделившуюся в результате отжига графита в диапазоне от температуры облучения до 1300 °С, определяли путем численного интегрирования $dS/dT(T)$, приведенных на рис. 1, в интервале температуры 400 ÷ 1300 °С. Значения S представлены на рис. 2, откуда видно, что с увеличением флюенса нейтронов общая запасённая энергия у образцов, облучённых при температуре 450 °С, сначала возрастает и достигает значения приблизительно 200 Дж/г, а начиная с $1,6 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$ уже существенно не меняется.

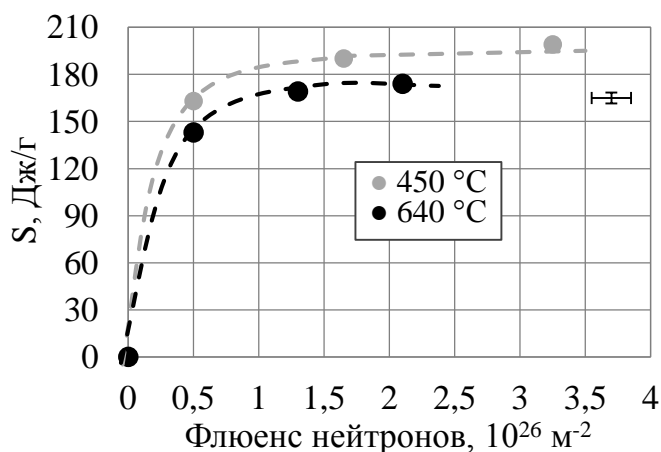


Рисунок 2 – Зависимость общей запасённой энергии, выделившейся при отжиге облучённых образцов в интервале температуры 400 ÷ 1300 °С, от флюенса нейтронов

У образцов, облучённых при температуре 640 °С, величина S близка к насыщению при флюенсе нейтронов $\sim (0,7 \div 1,0) \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$, вместе с тем предельная величина общей запасённой энергии на 20 ÷ 25 Дж/г ниже общей запасённой энергии образцов, облучённых при температуре 450 °С до тех же флюенсов нейтронов.

Стадия стабилизации на зависимости общей запасённой энергии от флюенса нейтронов объясняется, как правило, увеличением числа стоков, а

снижение величины S при увеличении температуры облучения – термическим отжигом дефектов в процессе облучения.

Выделение запасённой энергии $180 \div 200$ Дж/г при отжиге графита в диапазоне температуры $400 \div 1300$ °С приводит к его дополнительному разогреву приблизительно на 100 °С.

Кинетика отжига радиационных дефектов. Зависимость $dS/dT(T)$ позволяет установить число и последовательность элементарных стадий отжига радиационных дефектов и определить значения параметров их кинетических уравнений. Методика кинетического анализа кривых $dS/dT(T)$, полученных при постоянной скорости нагрева образцов, подробно описана в работах [8, 9].

На рисунке 3 приведены зависимости $dS/dT(T)$, полученные при отжиге двух образцов, облучённых при температуре 450 °С до флюенса нейтронов $3,2 \cdot 10^{26}$ м⁻², с разными скоростями нагрева 20 °С/мин и 40 °С/мин.

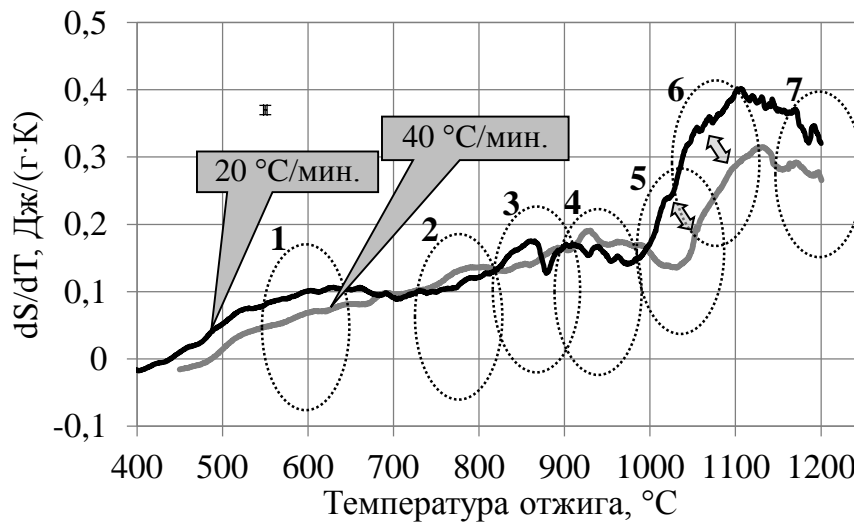


Рисунок 3 – Зависимость скорости выхода запасённой энергии от температуры отжига при скорости нагрева образца 20 °С/мин. и 40 °С/мин.

На кривых можно выделить 7 элементарных стадий.

Зависимость скорости выхода запасённой энергии от температуры отжига на каждой стадии можно описать уравнением [8]:

$$\frac{dS(E, T)}{dT} = -\frac{\nu}{a} S(E, T) \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), \quad (1)$$

где $dS(E, T)/dT$ – скорость выхода запасённой энергии, Дж/(г·К); E – энергия активации дефектов, эВ; ν – частота процесса отжига, 1/с; k – постоянная Больцмана, эВ/К; T – температура отжига, К; a – скорость нагрева, К/с; $S(E, T)$ – запасённая энергия, Дж/г.

Решением уравнения (1) является функция:

$$S(E, T) = S(E, 0) \exp\left[\frac{-\nu E}{ak} H\left(\frac{kT}{E}\right)\right], \quad H(x) = \int_0^x \exp\left(-\frac{1}{y}\right) dy. \quad (2)$$

График функции $S(E, T)$ имеет колоколообразный вид. Из равенства нулю в точке максимума ($T = T_m$) производной $S(E, T)$ можно записать, считая, что энергия активации имеет нормальное распределение с математическим ожиданием E_0 и среднеквадратическим отклонением ε , следующее:

$$\ln\left(\frac{a}{T_m^2}\right) = \ln\frac{\nu k}{E_0} - \frac{E_0}{kT_m}. \quad (3)$$

Последнее уравнение позволяет определить кинетические параметры ν и E_0 :

$$\nu = \frac{E_0}{k} \exp(B), \quad E_0 = -Ak, \quad (4)$$

где A и B – это коэффициенты уравнения (3) в координатах $(\frac{1}{T_m}, \ln(\frac{a}{T_m^2}))$.

Графики уравнения (3) и рассчитанные по ним кинетические параметры ν и E_0 для каждой из 7 стадий отжига образца, облучённого при температуре 450 °С до флюенса нейтронов $3,2 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$, представлены на рисунке 4 и в таблице 1.

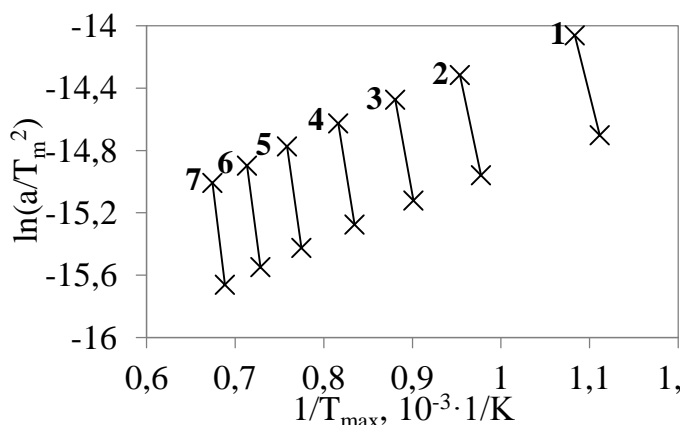


Рисунок 4 – Связь между скоростью нагрева и температурой, соответствующей максимуму скорости выхода запасённой энергии

Таблица 1 – Кинетические параметры процессов отжига

№ пика	$T_m, \text{ }^\circ\text{C}$	$E_0, \text{ эВ}$	$\varepsilon, \text{ эВ}$	$\nu, \text{ сек.}^{-1}$
1	630	1,95	$1,8 \cdot 10^{-1}$	$8,2 \cdot 10^8$
2	750	2,33	$4,7 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^9$
3	840	2,70	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{10}$
4	920	3,03	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{10}$
5	1020	3,44	$6,9 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{11}$
6	1100	3,72	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$3,6 \cdot 10^{11}$
7	1180	4,03	$8,1 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{11}$

На рисунке 5 приведена расчётная кривая $dS/dT(T)$, представляющая собой суперпозицию $dS/dT(T)$ 7 элементарных стадий, а также экспериментальные значения dS/dT . Видно, что расчётные значения dS/dT хорошо согласуются с экспериментальными.

Согласно литературным данным [4, 6] в графите при температуре облучения 400 ÷ 500 °С междуузельные атомы из-за их низкой энергии активации уже в процессе облучения образуют крупные кластеры, перерождающиеся затем в дополнительные атомные плоскости. Вакансии, напротив, приобретают подвижность только в районе температуры 500 ÷ 600 °С. Следовательно, можно предположить, что первый пик, наблюдаемый на $dS/dT(T)$ при температуре 630 °С,

обусловлен миграцией моновакансий. Значения энергии активации моновакансий, полученные различными авторами экспериментальным путем, значительно отличаются и лежат в интервале от 1,8 до 3,6 эВ, а значения, полученные на основе квантово-механических расчетов, группируются вокруг величины 1,7 эВ [10]. В работе [11] экспериментально установлено, что энергия миграции вакансий в сильно облученном графите является переменной величиной $\sim 1,8 \pm 0,3$ эВ. Таким образом, полученные нами экспериментальные данные подтверждают выводы авторов работ [4, 6, 10, 11], что процесс отжига моновакансий имеет место в интервале температуры $500 \div 600$ °С с переменной энергией активации $1,95 \pm 0,18$ эВ.

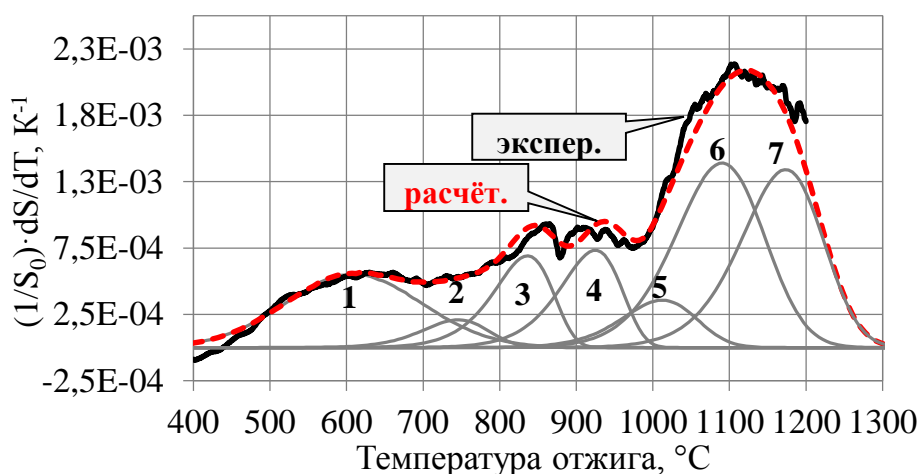


Рисунок 5 – Сравнение экспериментальной и расчётной кривой зависимости скорости выхода запасенной энергии от температуры отжига. Скорость выхода запасенной энергии нормирована

Мигрирующие вакансии, взаимодействуя друг с другом, образуют дивакансии и, с меньшей вероятностью, более крупные вакансионные кластеры, при этом свободная энергия, приходящаяся на одну вакансию, уменьшается.

Процессы отжига облученного графита при температуре выше 600 °С изучены очень слабо ввиду большого количества возможных конфигураций радиационных дефектов. Процессы отжига, которые соответствуют стадиям $2 \div 4$ и имеют энергию активации $2,33 \div 3,03$ эВ, можно отнести, по всей видимости, к миграции дивакансий. В работе [10] приведены различные конфигурации дивакансий и показано, что одна из них, дивакансия третьего порядка, может перемещаться посредством двойной трансформации в решетке графита с энергией активации 2,8 эВ, что близко к энергии активации стадий $2 \div 4$. При движении дивакансии взаимодействуют друг с другом, образуя квадровакансии, и с кластерами вакансионного и внедренного типов, изменяя их размер. Энергии активации этих процессов зависят так же от высоты энергетического барьера, который

преодолевают подвижные дивакансии при слиянии с другим дефектом, что может приводить к появлению дополнительных пиков на кривой $dS/dT(T)$, как это наблюдается в нашем случае.

В интервале температуры $900 \div 1300$ °С были выделены три пика с энергиями активации процесса отжига 3,44 эВ, 3,72 эВ и 4,03 эВ. Эти значения сравнимы с расчетными значениями энергии «испарения» моновакансии из 4 ÷ 6 вакансионного кластера или дислокационной петли (3,2 ÷ 3,6 эВ), приведёнными в работе [10]. Испарившиеся моновакансии обладают высокой подвижностью (энергия миграции составляет 1,7 эВ) и сливаются с неподвижными вакансионными или междуузельными кластерами с выделением значительного количества запасённой энергии.

В четвёртой главе приведены результаты исследований теплопроводности облучённого графита.

Теплопроводность графита измеряли в диапазоне температуры $25 \div 1200$ °С. Особое внимание в работе уделено коэффициенту теплопроводности (λ) при температуре измерения, равной температуре облучения ($T_{изм}=T_{обл}$).

Теплопроводность графита при $T_{изм}=T_{обл}$. На рисунке 6 приведены зависимости относительного изменения коэффициента теплопроводности $\Delta\lambda/\lambda_{исх}=(\lambda_{исх}-\lambda_{обл})/\lambda_{исх}$ при $T_{изм}=T_{обл}$ от флюенса нейтронов для температуры облучения 450 °С, 560 °С и 640 °С.

Под действием облучения, как видно из рис. 6, теплопроводность графита уменьшается, причём величина относительного изменения коэффициента теплопроводности для всех температур облучения спадает немонотонно с увеличением флюенса нейтронов.

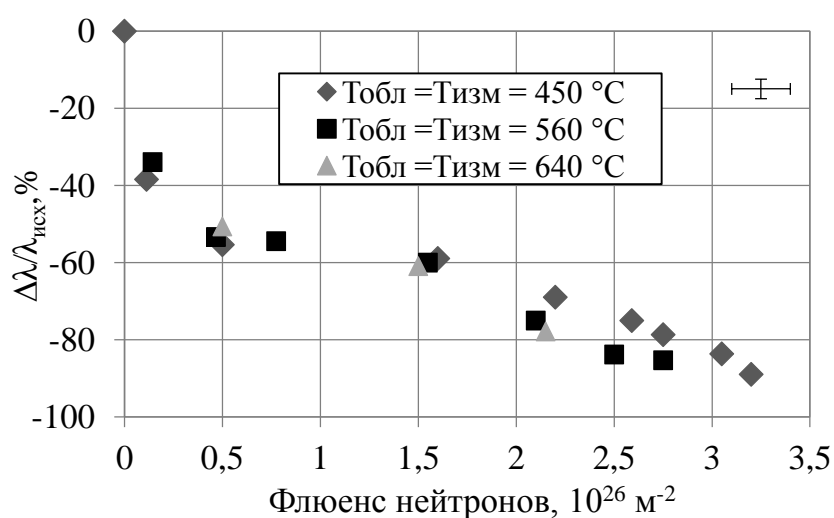


Рисунок 6 – Зависимость от флюенса нейтронов относительного изменения коэффициента теплопроводности графита, облучённого при температурах: 450 °С, 560 °С и 640 °С

Для каждой температуры облучения можно выделить три интервала флюенса нейтронов (F): 1-ый интервал – малые F (до $0,5 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$), где наблюдается резкое падение величины $\Delta\lambda/\lambda_{исх}$; 2-ой интервал – промежуточные F ($0,5 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2} \div 1,5 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$), где изменение $\Delta\lambda/\lambda_{исх}$ незначительно; и 3-ий интервал – F выше $1,5 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$, где вновь начинается ускорение темпов падения λ .

Резкое падение λ на начальном этапе облучения является следствием интенсивного накопления точечных радиационных дефектов и их мелких скоплений. Вторая стадия (стадия стабилизации теплопроводности) наступает в результате возрастающего числа стоков, когда количество вновь образованных дефектов компенсируется количеством дефектов, исчезнувших на стоках [12, 13]. Ускорение темпов падения λ на третьей стадии происходит из-за активного зарождения и роста микротрещин [13].

На рисунке 7 представлена зависимость коэффициента теплопроводности образцов, облучённых до флюенса нейтронов выше $0,5 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$, при $T_{изм} = T_{обл}$ от температуры облучения ($\lambda_{обл}(T_{обл})$). Коэффициент теплопроводности с увеличением температуры облучения уменьшается, что связано, по всей видимости, с ускорением процесса образования микротрещин.

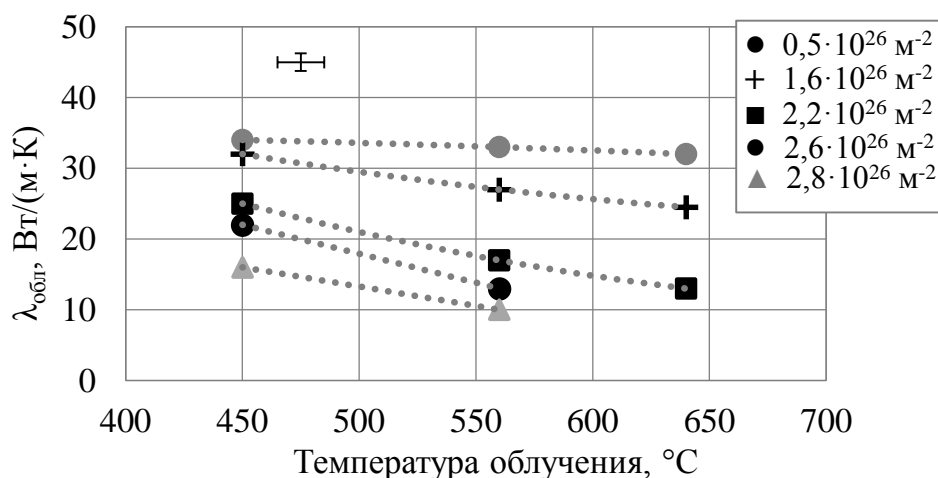


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента теплопроводности облучённого графита от температуры облучения

В работе была получена аналитическая зависимость коэффициента теплопроводности при $T_{изм} = T_{обл}$ от параметров облучения в области высоких флюенсов нейтронов ($\lambda_{обл}(T, F)$).

Поскольку в результате образования микротрещин под действием облучения наряду со снижением теплопроводности при некотором значении флюенса нейтронов (так называемом критическом флюенсе) происходит распухание образца [13], для формирования зависимости $\lambda_{обл}(T, F)$ в области высоких флюенсов нейтронов было применено эмпирическое уравнение, связывающее изменение коэффициента теплопроводности с изменениями размеров под облучением [14]:

$$\lambda_{обл} = \frac{\lambda_{исх}(T)}{S(T) + V_R(F, T) \cdot (F - F_{кр}(T)) + 1}, \quad (5)$$

$$V_R(F, T) = \left(\frac{\Delta V}{V_{исх}}(F) / \left(\frac{\Delta V}{V_{исх}} \right)_{min} \right)_T - 1, \quad (6)$$

где $\lambda_{исх}(T)$, $\lambda_{обл}(T)$ – коэффициент теплопроводности исходного и облучённого графита, Вт/(м·К); $V_{исх}$ – исходный объём образца, м³; $S(T)$ – относительное изменение термосопротивления ($1/\lambda_{обл}$) в интервале флюенсов нейтронов, где зависимость коэффициента теплопроводности от флюенса нейтронов выходит на плато (2 стадия); F – флюенс быстрых нейтронов, 10²⁶ м⁻²; $F_{кр}(T)$ – критический флюенс нейтронов (флюенс нейтронов, при котором объём образца после стадии усадки возвращается к своему исходному значению), 10²⁶ м⁻²; $\Delta V/V_{исх}$ – относительное изменение объёма образца при $T_{обл}$; $(\Delta V/V_{исх})_{min}$ – минимальное относительное изменение объёма образца при $T_{обл}$.

Для практического использования этой формулы необходимо было определить зависимости от параметров облучения отдельных её членов – $\lambda_{исх}(T)$, $S(T)$, $V_R(F, T)$ и $F_{кр}(T)$. Значения $\lambda_{исх}(T)$, $S(T)$, $V_R(F, T)$ и $F_{кр}(T)$ представлены на рисунках 8 ÷ 11, часть из них были получены в рамках этой работы, остальные – взяты из работ [13, 14, 15, 16].

Приведённые на рисунке 10 значения S из работы [14] – это относительные изменения термосопротивления на стадии насыщения функции $\lambda(F)$, усреднённые по нескольким маркам зарубежного реакторного графита, технология изготовления и свойства которых близки к графиту ГР-280. Все значения $V_R(F, T)$ и $F_{кр}(T)$ приведены к условиям облучения в реакторе БОР-60.

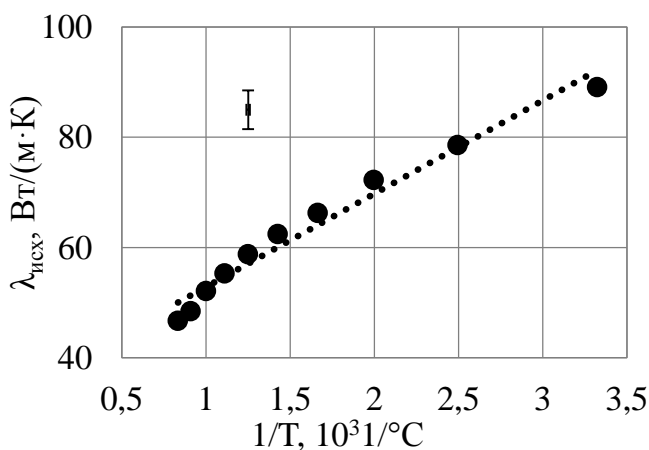


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента теплопроводности необлучённого графита ГР-280 от температуры измерения

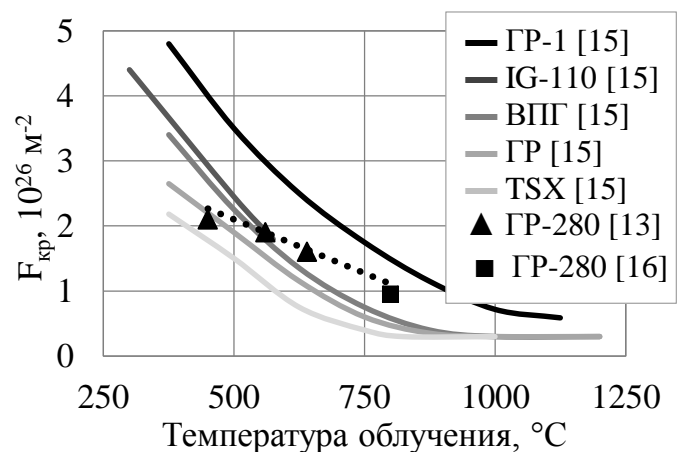


Рисунок 9 – Зависимость критического флюенса нейтронов реакторного графита от температуры облучения

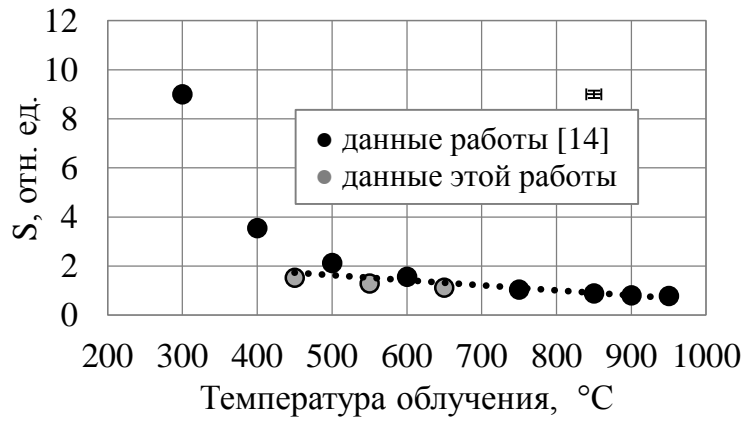


Рисунок 10 – Зависимость величины S реакторного графита от температуры облучения

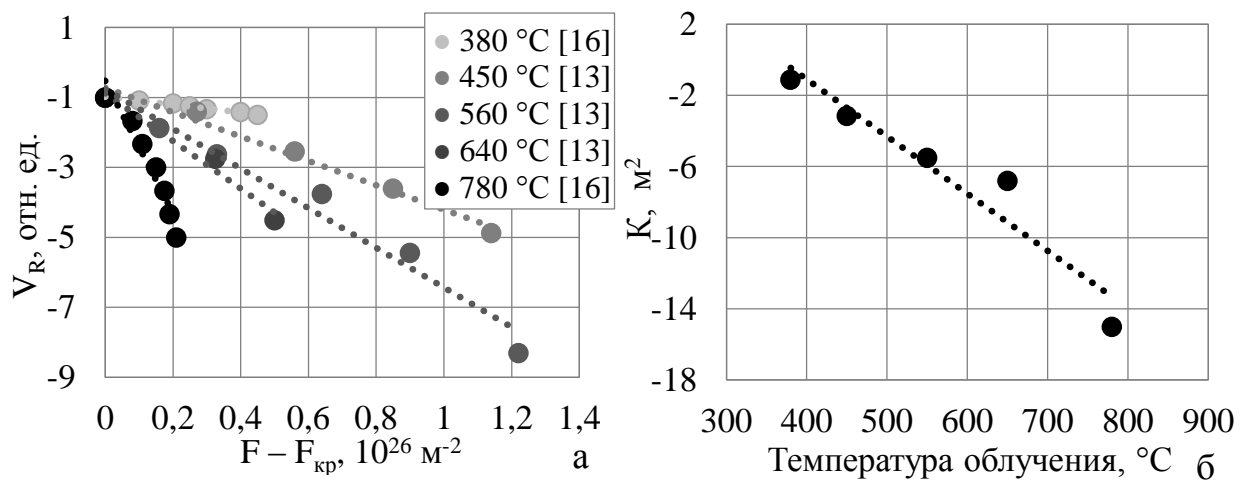


Рисунок 11 – Экспериментальные данные и график функции $V_R(F, T)$: а – общий вид, б – зависимость углового коэффициента функции $V_R(F, T)$ от температуры облучения

Коэффициент теплопроводности исходного графита, относительное изменение термосопротивления на стадии насыщения функции $\lambda(F)$ и критический флюенс нейтронов зависят только от температуры и в диапазоне $450 \div 800$ °C могут быть аппроксимированы линейными функциями:

$$\lambda_{исх} = (16,9/T) \cdot 10^3 + 35,9, \quad (7)$$

$$F_{кр} = -3,31 \cdot T \cdot 10^{-3} + 3,75, \quad (8)$$

$$S = -2,11 \cdot T \cdot 10^{-3} + 2,67 \quad (9)$$

$V_R(F, T)$ в координатах $(F - F_{кр}, V_R)$ также может быть задана линейной функцией следующего вида:

$$V_R(F, T) = K \cdot (F - F_{кр}) - 1. \quad (10)$$

Угловым коэффициентом K в уравнении (10) зависит от температуры следующим образом:

$$K = -3,21 \cdot T \cdot 10^{-2} + 11,7. \quad (11)$$

Выражения (5 ÷ 11) представляют собой аналитическую зависимость коэффициента теплопроводности графита ГР-280 от температуры облучения и флюенса нейтронов в области флюенса нейтронов выше критического и в диапазоне температуры 450 ÷ 800 °С. При температуре выше 800 °С зависимость $F_{кр}(T)$ у реакторного графита (см. рис. 9) резко меняет свой характер, переходя от стадии быстрого снижения $F_{кр}$ с увеличением температуры к практически постоянному значению $F_{кр}$, и выражение (8) становится некорректным.

На рисунке 12 приведён график зависимости $\lambda_{обл}(T, F)$ вместе с имеющимися экспериментальными точками $\lambda_{обл}$. Следует отметить согласованность экспериментальных и расчётных данных.

Согласно уравнениям (5 ÷ 11), с увеличением $T_{обл}$ в интервале 450 ÷ 700 °С, типичном для эксплуатации в реакторах РБМК, величина $\lambda_{обл}$ спадает в разы и при флюенсе нейтронов выше $2,5 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$ достигает значений менее 5 Вт/(м·К) (см. рис. 12).

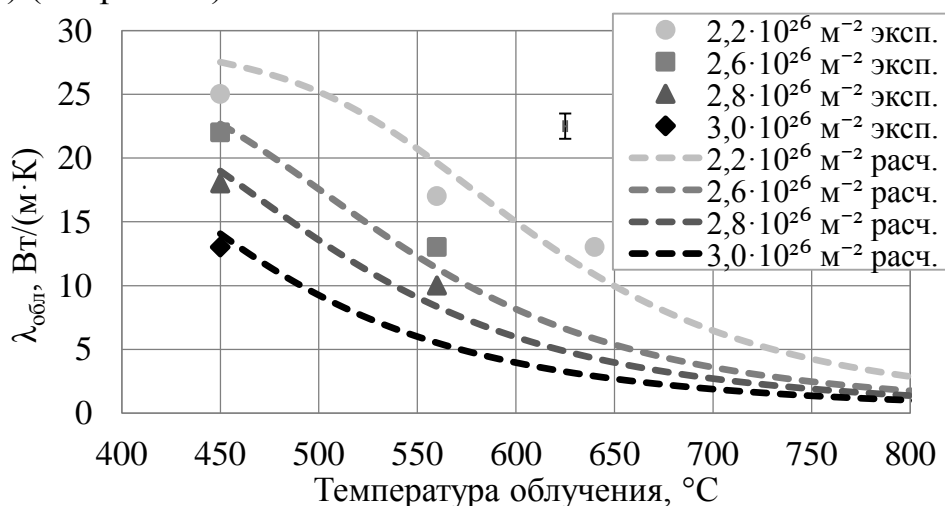


Рисунок 12 – Экспериментальные и рассчитанные по формуле (5) значения коэффициента теплопроводности облучённого графита ГР-280.

Температура измерения равна температуре облучения

Влияние послереакторного термического отжига на теплопроводность графита

Отжиг облучённых образцов выполняли при температурах 600 °С, 800 °С, 1000 °С и 1200 °С в течении 2 часов.

Как показали результаты измерения, отжиг при температуре до 800 °С не оказывает значительного влияния на теплопроводность образца: до отжига величина относительного изменения коэффициента теплопроводности ($\Delta\lambda/\lambda = (\lambda_{обл} - \lambda_{исх})/\lambda_{исх}$), измеренного при температуре, равной температуре облучения, составляет -64 %, а после отжига при 600 °С и 800 °С соответственно -63 и

-61 % (рис. 13). При температуре отжига выше 800 °С происходит резкое уменьшение относительного изменения коэффициента теплопроводности: после отжига при 1000 °С $\Delta\lambda/\lambda$ достигает -54 %, а после отжига при 1200 °С – -34 %.

На рисунке 14 приведена зависимость коэффициента теплопроводности образцов, облучённых до флюенса нейтронов $0,5 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$ и $1,5 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$, до и после отжига при 1200 °С от температуры облучения. Измерения выполнены при комнатной температуре.

Из рисунка видно, в результате термического отжига коэффициент теплопроводности увеличивается на $19 \div 39 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, причём разность между теплопроводностью образца до и после отжига ($\lambda_{\text{обл+отж}} - \lambda_{\text{обл}}$) с увеличением температуры облучения и флюенса нейтронов уменьшается: с повышением флюенса нейтронов от $0,5 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$ до $1,5 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$ ($\lambda_{\text{обл+отж}} - \lambda_{\text{обл}}$) снижается на $11 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ (при температуре облучения 450 °С), а с возрастанием температуры облучения с 450 °С до 640 °С – на $9 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ (при флюенсе нейтронов $1,5 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$). При этом независимо от параметров облучения коэффициент теплопроводности образцов увеличивается под действием отжига в среднем в 2,3 раза.

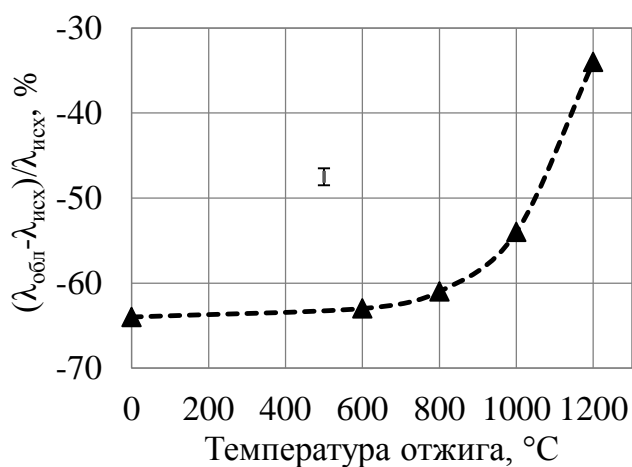


Рисунок 13 – Зависимость от температуры отжига относительного изменения коэффициента теплопроводности образца, облучённого при 450 °С до флюенса нейтронов $1,5 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$

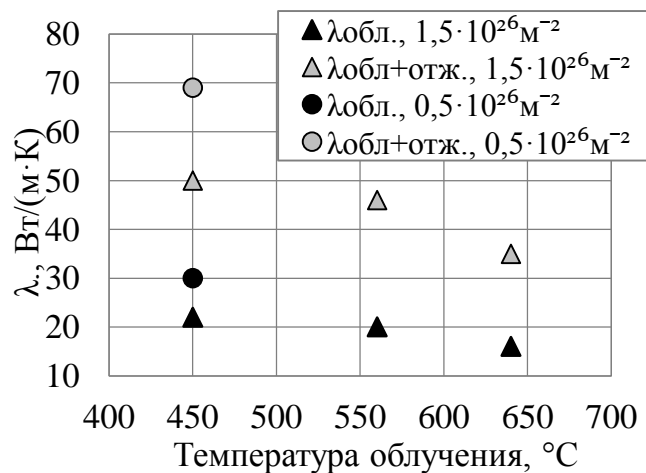


Рисунок 14 – Зависимость коэффициента теплопроводности образцов, облучённых до флюенса нейтронов $0,5 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$ и $1,5 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$, от температуры облучения до и после отжига при 1200 °С

Снижение ($\lambda_{\text{обл+отж}} - \lambda_{\text{обл}}$) при увеличении флюенса нейтронов и температуры облучения связано, по всей видимости, с отжигом радиационных дефектов в процессе облучения, в результате которого происходит их укрупнение или исчезновение на стоках и соответственно ускорение процесса межкристаллитного растрескивания [13].

Выводы

1. Прирост выхода запасённой энергии в зависимости от флюенса нейтронов вплоть до $F = 3,2 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$ при послерадиационном отжиге в диапазоне от $450 \div 640 \text{ }^\circ\text{C}$ до $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ графита ГР-280 прекращается при флюенсе нейтронов около $(0,7 \div 1,5) \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$. Предельная величина общей запасённой энергии при $T_{\text{обл}} = 450 \text{ }^\circ\text{C}$ составляет около 200 Дж/г , а при $T_{\text{обл}} = 640 \text{ }^\circ\text{C}$ – около 180 Дж/г . При температуре послерадиационного отжига 1100°C скорость выхода запасённой энергии максимальна.

2. Спектр скорости выхода запасённой энергии графита ГР-280, облучённого при $T_{\text{обл}} = 450 \text{ }^\circ\text{C}$ до $F = 3,2 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$, в интервале от $T_{\text{обл}}$ до $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ включает в себя 7 стадий с энергиями активации дефектов от $1,95$ до $4,03 \text{ эВ}$. Согласно современным теоретическим моделям, такому диапазону энергии активации соответствуют энергии миграции моно- и дивакансий, а также энергия «испарения» моновакансии из $(4 \div 6)$ вакансионного кластера или дислокационной петли.

3. Установлено, что при температуре нормальной эксплуатации графитовой кладки в реакторе РБМК-1000 ($450 \div 640 \text{ }^\circ\text{C}$) в области флюенса нейтронов выше критического происходит резкое снижение коэффициента теплопроводности графита марки ГР-280 с увеличением F и $T_{\text{обл}}$, вероятно, из-за значительного накопления микротрещин в графите под облучением. Предложена аналитическая зависимость коэффициента теплопроводности графита ГР-280 при этих температурах от параметров облучения, которая учитывает образование микротрещин в графите при облучении в области высоких флюенсов нейтронов. С использованием этой зависимости проведена экстраполяция полученных экспериментальных результатов до $T_{\text{обл}} = 800 \text{ }^\circ\text{C}$, и показано, что коэффициент теплопроводности при увеличении $T_{\text{обл}}$ с $450 \text{ }^\circ\text{C}$ до $800 \text{ }^\circ\text{C}$ уменьшается почти на порядок.

4. Установлено, что коэффициент теплопроводности графита ГР-280, облучённого при $450 \div 640 \text{ }^\circ\text{C}$ до флюенса нейтронов $(0,5 \div 1,5) \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$, в результате термического отжига при $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ в течении 2 ч увеличивается на $19 \div 39 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ (при комнатной температуре измерения). Эффект отжига в абсолютных величинах в указанном выше диапазоне параметров облучения снижается с увеличением флюенса нейтронов и температуры облучения, однако отношение коэффициента теплопроводности до и после отжига является постоянной величиной, равной $2,3$.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Покровский, А.С., Белан, Е.П., Харьков, Д.В. Запасённая энергия в графите, облучённом до высоких флюенсов нейтронов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 5-1. – С. 130-136.

2. Покровский, А.С., Белан, Е.П., Харьков, Д.В. Теплопроводность графита ГР-280, облучённого до высокого флюенса нейтронов // **Фундаментальные исследования.** – 2015. – № 12-6. – С. 1126-1133.
3. Белан, Е.П., Покровский, А.С., Харьков, Д.В. Влияние термического отжига на теплопроводность графита марки ГР-280, облучённого до высокого флюенса нейтронов // **Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки.** – 2017 – № 1 (41). – С. 82–91.
4. Исследование радиационной стойкости графита ГР-280 с учетом влияния гамма-излучения: отчёт о НИР / А.С. Покровский, В.С. Сандаков и др. – Димитровград: НИИАР, 2009. – 77 с.
5. Покровский, А.С., Харьков, Д.В., Бутылин, А.С., Белан, Е.П. Методическое обеспечение исследований теплофизических свойств и открытой пористости облученного графита // X Российская конференция по реакторному материаловедению, Димитровград, 27 - 31 мая 2013 г.: Тез. докл. – Димитровград: НИИАР. – 2013.
6. Покровский, А.С., Белан, Е.П., Авдонин, А.В. Изменение теплофизических свойств облучённого реакторного графита при высокотемпературном отжиге // **Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР».** – 2015. – Вып.1. – С. 3-10.
7. Покровский, А.С., Белан, Е.П., Харьков, Д.В. Запасённая энергия в графите, облучённом до высоких флюенсов нейтронов // Всероссийской молодежной научно-технической конференции с международным участием «Инновации в материаловедении», Москва, 01 - 04 июня 2015 г.: Тез. докл. – 2015.
8. Белан, Е.П., Харьков, Д.В. Влияние термического отжига на теплопроводность графита марки ГР-280, облучённого до высокого флюенса нейтронов// **Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР».** – 2016. – Вып. 1. – С. 26–31.
9. Покровский, А.С., Белан, Е.П., Харьков, Д.В. Теплопроводность графита ГР-280, облучённого до высокого флюенса нейтронов // Всероссийская молодежная конференция «Научные исследования и технологические разработки в обеспечение развития ядерных технологий нового поколения», Димитровград, 05-07 апреля 2016 г.: Тез. докл. – Димитровград: НИИАР. – 2016.

Список литературы

1. Обоснование предельно достижимого срока эксплуатации графитовых кладок РБМК-1000: целевая программа 4.85 П. - Москва, НИКИЭТ. - 1997.
2. Платонов, П.А. Расчетно-экспериментальные исследования энергии Вигнера и физических свойств графита вытеснителей СУЗ РБМК / П.А. Платонов [и др.]// **Атомная энергия.** – 2003. - № 94 (4). - С 270.
3. Цыганов, А.А. Запасенная энергия в графите кладок остановленных промышленных уран-графитовых реакторов / А.А. Цыганов [и др.] // **Известия Томского политехнического университета.** - 2008. - № 312(2). - С 32-38.

4. Burchell, T. Irradiation Damage in Graphite – from the Nano- to the Mille-Metric Scale / T. Burchell // Technical Meeting on High-Temperature Qualification of High Temperature Gas Cooled Materials (Vienna, 10-13 Jun 2014). - Vienna, 2014. - P. 11.
5. Gallego, N. C. A Review of Stored Energy Release of Irradiated Graphite / N. C. Gallego, T. D. Burchell // Milestone Report on the Workshop on HTGR Graphite Stored Energy Release, ORNL/TM-2011/378 (Oak Ridge, September 2011). - Oak Ridge, 2011. - P. 55.
6. Telling, R. H. Radiation defects in graphite / R. H. Telling, M. I. Heggie // Phil Mag. - 2007. - № 87. - P. 797-846.
7. Simmons, J.H. Radiation damage in graphite / J.H. Simmons. - Oxford: Pergamon Press, 1965. - 242 p.
8. Iwata, T. Fine structure of Wigner energy release spectrum in neutron irradiated graphite / T. Iwata // J. Nucl. Mater. - 1985. - № 133&134. - P. 361-364.
9. Lasithiotakis, M. Application of an independent parallel reactions model on the annealing kinetics of BEPO irradiated graphite / Michael Lasithiotakis, Barry J. Marsden, T. James Marrow // J. Nucl. Mater. - 2012. - № 427. - P. 95-109.
10. El-Barbary, A. A. First principles characterization of defects in irradiated graphitic materials: A thesis submitted towards fulfilment of the requirement for the degree of Doctor of Philosophy. - Sussex, 2005. - 171 p.
11. Asari, E. Thermal relaxation of ion-irradiation damage in graphite / E. Asari, M. Kitajima, K. G. Nakamura & T. Kawabe // Phys. Rev. - 1993. - №. 47. - P. 11143-11148.
12. Гончаров, В. В. Действие облучения на графит ядерных реакторов / В. В. Гончаров [и др.]. - М.: Атомиздат, 1978. - 272 с.
13. Харьков, Д. В. Влияние высокодозного нейтронного облучения на изменение физических свойств реакторного графита: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Димитровград. 2011. - 126 с.
14. Haag, G. Properties of ATR-2E Graphite and Property Changes due to Fast Neutron Irradiation / G. Haag // Report No. Jul-4183 (Jülich, Germany, 2005). - Jülich, Germany, 2005. - P. 148.
15. Виргильев, Ю. С. Реакторный графит: разработка, производство и свойства / Ю. С. Виргильев [и др.] // Российский химический журнал (ЖРХО им. Д.И. Менделеева). - 2006. - № 50 (1). - С. 4-12.
16. Лебедев, И.Г. Радиационная стойкость графита ядерных реакторов / И.Г. Лебедев. - Димитровград: ФГУП “ГНЦ РФ НИИАР”, 2005. - 249 с.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

РБМК	-	реактор большой мощности, каналный;
ОУ	-	облучательное устройство.