МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования

«Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева»

(Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева)

|  |  |
| --- | --- |
| **РАЗРАБОТАНА** | **УТВЕРЖДЕНА** |
| Кафедрой технологии материалов и промышленной инженерииПротокол №2 от 03 октября 2024 г. | Ученым советом факультета физики, математики и инженерных технологийПротокол №2 от 17 октября 2024 г. |

**ПРОГРАММА КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА**

|  |
| --- |
| **1.3.8 «Физика конденсированного состояния»** |

*шифр и наименование научной специальности*

Астрахань – 2024

Программа кандидатского экзамена составлена в соответствии с приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от  [от 24 февраля 2021 г. № 118 (зарегистрирован Минюстом России 6 апреля 2021 г., регистрационный № 62998)](http://vak1.ed.gov.ru/common/img/uploaded/files/2012/news/03/Programmy_kandidatskikh_ekzamenov.7z) с номенклатурой и паспортом научной специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния».

Программа кандидатского экзамена и список основной и дополнительной литературы обновлены с учетом развития науки, культуры, экономики, техники, технологий и социальной сферы.

Год обучения: 2024-2025 уч. год.

Форма контроля: кандидатский экзамен

Трудоемкость в ЗЕ: в соответствии с учебным планом 5.

Программу разработали:

Меркулов Д.И., к.ф.-м.н., доцент технологии материалов и промышленной инженерии;

Датская З.Р. к.ф.-м.н., доцент технологии материалов и промышленной инженерии.

1. **ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

 Кандидатский экзамен по специальной дисциплине является неотъемлемой частью государственной итоговой аттестации научно-педагогических кадров высшей квалификации.

 Настоящая программа кандидатского экзамена по специальной дисциплине «Физика конденсированного состояния» отражает современное состояние данной научной специальности и включает ее важнейшие разделы, знание которых необходимо высококвалифицированному специалисту.

 Программа состоит из трех частей. Первая часть представляет собой основную программу-минимум, утвержденную ВАК; в список литературы добавлены издания, вышедшие в последнее время. Вторая, дополнительная, часть разработана с учетом специализации аспирантов АГУ им. В.Н. Татищева в таких областях, как магнитные свойства твердых тел (в том числе, наноструктурированных) и теория молекулярных спектров, поэтому в программу включены вопросы, относящиеся к указанным областям. Третья часть содержит вопросы, связанные непосредственно с темами кандидатских диссертаций.

1. **Основные критерии оценивания**

(уровень знаний оценивается по пятибалльной системе)

1. Владение базовыми представлениями о физической природе и свойствах кристаллических, аморфных, неорганических и органических веществ в конденсированном состоянии в зависимости от их химического и фазового состава, температуры и внешних воздействий.
2. Понимание принципов теории конденсированных сред; знание основных понятий, явлений и законов, относящихся к данной области науки.
3. Владение основами математических методов описания структуры, состояния и свойств твердых тел.
4. Знание методов получения и исследования структуры и свойств материалов. Понимание процессов формирования иерархической структуры конденсированных сред. Знание физических основ и характеристик аналитических методов исследования реальных объектов.
5. Владение представлениями о взаимосвязи «состав–структура–свойства–функции» ряда конкретных видов конденсированных сред, в том числе широко применяемых ферро- и ферримагнитных материалов.
6. Понимание связи физики конденсированного состояния с другими науками и техникой.
7. Умение аргументировано отвечать на вопросы, владение современной научно-технической терминологией.
8. Полнота ответа на вопросы программы экзамена и дополнительные вопросы членов экзаменационной комиссии.

Соотношение критериев оценивания ответа, поступающего в аспирантуру:

* правильные представления, знание основных положений, законов, теоретических и экспериментальных методов, грамотное и полное изложение сущности вопроса, аргументированные ответы на дополнительные вопросы – 5 баллов;
* достаточное понимание излагаемого материала, владение терминологией, отдельные неточности и упущения в ответах – 4 балла;
* знание отдельных положений и фактов, слабая теоретическая база, неуверенная аргументация ответов на вопросы - 3 балла;
* отсутствие или ошибочность базовых представлений, незнание основных явлений и законов, слабое владение отдельными теоретическими или практическими вопросами – 2 балла.
1. **Содержание**

**3.1. Основная программа**

1. Силы связи в твердых телах

 Электронная структура атомов. Химическая связь и валентность. Типы сил связи в конденсированном состоянии: ван-дер-ваальсова связь, ионная связь, ковалентная связь, металлическая связь.

 Химическая связь и ближний порядок. Структура вещества с ненаправленным

взаимодействием. Примеры кристаллических структур, отвечающих плотным упаковкам шаров: простая кубическая, ОЦК, ГЦК, ГПУ, структура типа CsCl, типа NaCl, структура типа перовскита CaTiO3.

 Основные свойства ковалентной связи. Структура веществ с ковалентными связями. Структура веществ типа селена. Гибридизация атомных орбиталей в молекулах и кристаллах. Структура типа алмаза и графита.

2. Симметрия твердых тел

 Кристаллические и аморфные твердые тела. Трансляционная инвариантность. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Ячейка Вигнера - Зейтца. Решетка Браве. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна.

 Элементы симметрии кристаллов: повороты, отражения, инверсия, инверсионные повороты, трансляции. Операции (преобразования) симметрии. Элементы теории групп, группы симметрии. Возможные порядки поворотных осей в кристалле. Пространственные и точечные группы (кристаллические классы). Классификация решеток Браве.

3. Дефекты в твердых телах

 Точечные дефекты, их образование и диффузия. Вакансии и межузельные атомы. Дефекты Френкеля и Шоттки.

 Линейные дефекты. Краевые и винтовые дислокации. Роль дислокаций в пластической деформации.

4. Дифракция в кристаллах

 Распространение волн в кристаллах. Дифракция рентгеновских лучей, нейтронов и электронов в кристалле. Упругое и неупругое рассеяние, их особенности.

Брэгговские отражения. Атомный и структурный факторы. Дифракция в аморфных веществах.

5. Колебания решетки

 Колебания кристаллической решетки. Уравнения движения атомов. Простая и сложная одномерные цепочки атомов. Закон дисперсии упругих волн. Акустические и оптические колебания. Квантование колебаний. Фононы. Электрон-фононное взаимодействие.

6. Тепловые свойства твердых тел

 Теплоемкость твердых тел. Решеточная теплоемкость. Электронная теплоемкость. Температурная зависимость решеточной и электронной теплоемкости.

Классическая теория теплоемкости. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы в классической физике. Границы справедливости классической теории.

 Квантовая теория теплоемкости по Эйнштейну и Дебаю. Предельные случаи высоких и низких температур. Температура Дебая.

 Тепловое расширение твердых тел. Его физическое происхождение. Ангармонические колебания.

Теплопроводность решеточная и электронная. Закон Видемана - Франца для электронной теплоемкости и теплопроводности.

7. Электронные свойства твердых тел

 Электронные свойства твердых тел: основные экспериментальные факты. Проводимость, эффект Холла, термоЭДС, фотопроводимость, оптическое поглощение. Трудности объяснения этих фактов на основе классической теории Друде.

Основные приближения зонной теории. Граничные условия Борна - Кармана. Теорема Блоха. Блоховские функции. Квазиимпульс. Зоны Бриллюэна. Энергетические зоны.

Брэгговское отражение электронов при движении по кристаллу. Полосатый спектр энергии.

Приближение сильносвязанных электронов. Связь ширины разрешенной зоны с перекрытием волновых функций атомов. Закон дисперсии. Тензор обратных эффективных масс.

Приближение почти свободных электронов. Брэгговские отражения электронов.

Заполнение энергетических зон электронами. Поверхность Ферми. Плотность состояний. Металлы, диэлектрики и полупроводники. Полуметаллы.

8. Магнитные свойства твердых тел

 Намагниченность и восприимчивость. Диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики. Законы Кюри и Кюри - Вейсса. Парамагнетизм и диамагнетизм электронов проводимости.

 Природа ферромагнетизма. Фазовый переход в ферромагнитное состояние. Роль обменного взаимодействия. Точка Кюри и восприимчивость ферромагнетика.

Ферромагнитные домены. Причины появления доменов. Доменные границы (Блоха, Нееля).

 Антиферромагнетики. Магнитная структура. Точка Нееля. Восприимчивость антиферромагнетиков. Ферримагнетики. Магнитная структура ферримагнетиков.

Спиновые волны, магноны.

 Движение магнитного момента в постоянном и переменном магнитных полях. Электронный парамагнитный резонанс. Ядерный магнитный резонанс.

9. Оптические и магнитооптические свойства твердых тел

 Комплексная диэлектрическая проницаемость и оптические постоянные. Коэффициенты поглощения и отражения. Соотношения Крамерса-Кронига.

 Поглощения света в полупроводниках (межзонное, примесное поглощение, поглощение свободными носителями, решеткой). Определение основных характеристик полупроводника из оптических исследований.

 Магнитооптические эффекты (эффекты Фарадея, Фохта и Керра).

 Проникновение высокочастотного поля в проводник. Нормальный и аномальный скин-эффекты. Толщина скин-слоя.

10. Сверхпроводимость

 Сверхпроводимость. Критическая температура. Высокотемпературные сверхпроводники. Эффект Мейснера. Критическое поле и критический ток.

Сверхпроводники первого и второго рода. Их магнитные свойства. Вихри Абрикосова. Глубина проникновения магнитного поля в образец.

Эффект Джозефсона.

Куперовское спаривание. Длина когерентности. Энергетическая щель.

**Основная литература**

1. Байков Ю.А., Кузнецов В.М. Физика конденсированного состояния. – Бином. Лаборатория знаний, 2011. – 296 с.

2. Лобзова Р.В.. Кристаллография. – М.: изд-во РУДН, 2008. – 64 с.

3. Дикарева Р.П. Введение в кристаллофизику. – М.: ФЛИНТА, 2007. – 240 с.

4. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. М.: Высш. шк., 2000.

5. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводимости. МЦ НМО, М., 2000.

6. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.

7. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. Т. I, II. М.: Мир, 1979.

8. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела. М.: Мир, 1969.

9. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М.: Мир, 1974.

10. Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1971.

11. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1979.

12. Дорфман Я.Г. Магнитные свойства и строение вещества. – ЛКИ, 2010. – 378 с.

**Дополнительная литература**

1. Н.Б.Делоне. Основы физики конденсированного вещества. – М.: Физматлит, 2011. – 236 с.

2. Г.И.Епифанов. Физика твердого тела. – М.: Лань, 2010. – 288 с.

3. Воронов В.К., Подоплелов А.В. [Современная физика: Конденсированное состояние](http://edurss.ru/cgi-bin/db.pl?lang=Ru&blang=ru&page=Book&id=75928&list=61).- М.: изд. ЛКИ, 2008. - 336 с.

4. Э.Э.Лорд, А.Л.Маккей, С.Ранганатан. Новая геометрия для новых материалов. – М.: Физматлит, 2010. – 270 с.

5. Н.Б.Брандт, В.А.Кульбачинский. Квазичастицы в физике конденсированного состояния. – М.: Физматлит, 2007. –632 с.

6. Гусев А.И. Нестеохиометрия, беспорядок, ближний и дальний порядок в твердом теле. - Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2007.

7. Боровик Е.С., Мильнер А.С., Еременко В.В. Лекции по магнетизму. - М.: Физматлит, 2005. – 512 с.

8. М.Л.Бараночников. Микромагнитоэлектроника. – ДМК Пресс, 2011. – 544 с.

9. Condensed Matter and Materials Physics. – Committee on Cmmp, Solid State Tech. –2007. - 284 p.

**3.2. Дополнительная программа**

 Настоящая дополнительная программа кандидатского экзамена разработана в рамках направлений научных исследований кафедры технологии материалов и промышленной инженерии АГУ им. В.Н. Татищева и с учётом возможной тематики диссертаций аспирантов, связанной, в основном, с вопросами радиационного материаловедения и разработкой радиационно-стойких материалов для атомной энергетики.

 Экзаменующиеся должны показать высокий уровень теоретической и профессиональной подготовки, знание структуры и свойств конкретных видов конденсированных сред, понимание механизмов происходящих в них явлений, знание методологических вопросов исследования реальных объектов, а также технологических процессов получения различных материалов и сфер их применения.

 В основу дополнительной программы кандидатского экзамена положены вопросы специальных дисциплин и дисциплин по выбору, входящих в состав учебного плана основной профессиональной образовательной программы по данному профилю подготовки.

1. Конструкционные материалы на основе легких металлов. Алюминий и его сплавы. Магний и его сплавы. Бериллий и его сплавы. Титан и его сплавы.

2. Конструкционные материалы на основе циркония. Свойства циркония. Влияние легирования на структуру, механические свойства и жаропрочность циркония. Коррозионная стойкость циркония и его сплавов. Взаимодействие циркония и его сплавов с водородом. Коррозионное растрескивание под напряжением. Модифицирование структурно-фазового состояния поверхностных слоев сплавов циркония. Радиационная стойкость циркония и его сплавов.

3. Конструкционные материалы на основе на основе железа. Железо и взаимодействие его с другими элементами. Классификация и маркировка сталей. Влияние легирования на структуру и механические свойства сталей. Теплоустойчивые и жаропрочные стали. Углеродистые и низколегированные стали перлитного класса. Хромистые стали. Жаропрочные коррозионно-стойкие стали аустенитного класса.

4. Жаропрочные никелевые сплавы. Основные свойства никеля. Легирующие элементы и примеси в никелевых сплавах. Влияние легирующих элементов на структуру и свойства никелевых сплавов. Коррозионная стойкость никелевых сплавов. Области применения никелевых сплавов.

5. Конструкционные материалы на основе тугоплавких металлов с ОЦК решеткой. Особенности легирования тугоплавких металлов. Пластичность тугоплавких металлов и их обработка. Окисление тугоплавких ОЦК металлов. Взаимодействие тугоплавких металлов с жидкометаллическими теплоносителями. Радиационная стойкость и применение тугоплавких металлов в ЯЭУ и ТЯР.

6. Реакторный графит. Конструкционный графит и его свойства. Физические свойства графита. Механические свойства графита. Коррозионная стойкость графита. Влияние облучения на свойства конструкционного графита. Применение графита в ЯЭУ и ТЯР.

**Список литературы**

1. Абрамович М.Д., Вотинов С.Н,, Иолтуховский А. Г. Радиационное материаловедение на АЭС. − М.: Энергоатомиздат, 1984.

2. Авторадиография поверхностей раздела и структурная стабильность сплавов / С.З. Бокштейн, С.С. Гинзбург, С.Т. Кишкин и др. − М.: Металлургия, 1987.

3. Алесковсхий В.Б. Химия твердых веществ: Учебное пособие. − М.: Высшая школа, 1978.

4. Бескоровайный Н.М., Иолтуховский А.Г. Конструкционные материалы и жидкометаллические теплоносители. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

5. Бескоровайный Н.М., Калин Б.А., Платонов П.А., Чернов И.И. Конструкционные материалы ядерных реакторов. − М.: Энергоатомиздат, 1995. − 704 с.

6. Болдырев В.В., Дяхов Н.З., Чупахин А.П. Химия твердого тела. − М.: Знание, 1982.

7. Волынова Т.Ф. Высокомарганцовистые стали и сплавы. − М.: Металлургия, 1988. − 343 с.

8. Гельд П.В., Рябов Р.А. Водород в металлах и сплавах. − М.: Металлургия, 1974.

9. Герасимов В.В., Монахов А.С. Материалы ядерной техники. − М.: Энергоиздат, 1982.

10. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. − М.: Металлургия, 1985. − 408 с.

11. Грибков В.А., Григорьев Ф.И., Калин Б.А., Якушин В.Л. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов. − М.: 2001. − 528 с.

12. Девятых Г.Г., Еллиев Ю.Е. Введение в теорию глубокой очистки веществ. − М.: Наука, 1981.

13. Дементьев Б.А. Ядерные энергетические реакторы. − 2-е изд. − М.: Энергоатомиздат, 1990. − 352 с.

14. Жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы на никелевой основе: Сборник трудов / Под ред. О.А. Банных. − М.: Наука, 1984.

15. Займовский А.С., Калашников В.В., Головнин И.С. Тепловыделяющие элементы атомных реакторов. − М.: Атомиздат, 1966. − 520 с.

16. Займовский А.С., Никулина А.В., Решетников Ф.Г. Циркониевые сплавы в ядерной энергетике. − М.: Энергоатомиздат, 1994. − 256 с.

17. Зеленский В.Ф., Неклюдов И.М., Черняева Т.П. Радиационные дефекты и распухание металлов. − Киев: Наукова думка, 1988.

18. Ибрагимов Ш.Ш., Кирсанов В.В., Пятилетов Ю.С. Радиационные повреждения металлов и сплавов. − М.: Энергоатомиздат, 1985.

19. Калин Б.А., Скорое Д.М., Якушин В.Л. Проблемы выбора материалов для термоядерных реакторов: Радиационная эрозия. − М.: Энергоатомиздат, 1985. 20. Калин Б.А., Чернов И.И., Шишкин Г.Н. Диаграммы состояния и структура конструкционных материалов ядерных реакторов: Учебное пособие. − М.: МИФИ, 1989. − 82 с.

21. Кирсанов В.В., Суворов А.Л., Трушин Ю.В. Процессы радиационного дефектообразования в металлах. − М.: Энергоатомиздат, 1985.

22. Коллингз Е.В. Физическое материаловедение титановых сплавов. − М.: Металлургия, 1988. − 224 с.

23. Конструкционные материалы АЭС / Ю.Ф. Баландин, И.В. Горынин, Ю.И. Звездин и др. − М.: Энергоатомиздат, 1984. − 280 с.

24. Конструкционные материалы ядерных реакторов: Учебное пособие. Ч. 1: Ядерные и теплофизические свойства, основы коррозии и жаропрочности / Н.М. Бескоровайный. Ю.С. Беломытцев, М.Д. Абрамович и др. − М.: Атомиздат, 1972.

25. Конструкционные материалы ядерных реакторов: Учебное пособие. Ч. 2: Структура, свойства, назначение / Н.М. Бескоровайный, Ю.С. Беломытцев, М.Д. Абрамович и др. − М.: Атомиздат, 1977. − 256 с.

26. Литий в термоядерной и космической энергетике XII века / В.Н. Михайлов, В.А. Евтихин, И.Е. Люблинский и др. − М.: Энергоатомиздат, 1999. − 528 с.

27. Лякишев Н.П., Плинер Ю.Л., Лаппо С.И. Боросодержащие стали и сплавы. − М.: Металлургия, 1986.

28. Ма Б.М. Материалы ядерных энергетических установок / Пер. с англ. − М.: Энергоатомиздат, 1987. − 408 с.

29. Мартин Дж., Доэрти Р. Стабильность микроструктуры металлических систем / Пер. с англ. − М.: Атомиздат, 1978.

30. Материаловедение и проблемы энергетики / Дж. Синфельд, М. Симанд, Дж. Хоув и др. / Пер. с англ. − М.: Мир, 1982.

**Дополнительный список литературы**

1. Многослойная сталь в сварных конструкциях / Б.Е. Патон, Б.И. Медовар, А.К. Цыкуленко. − Киев: Наукова думка, 1984.

2. Молибден в ядерной энергетике / В.С. Емельянов, А.И. Евстюхин, Г.А. Мочалов и др. − М.: Атомиздат, 1977.

3. Николаев Г.А., Фридляндер И.Н., Арбузов Ю.П. Свариваемые алюминиевые сплавы. − М.: Металлургия, 1990. − 296 с.

4. Новиков И.И., Строганов Г.Б. Новиков А.И. Металловедение, термообработка и рентгенография. − М.: МИСИС, 1994. − 480 с.

5. Паршин A.M. Структура, прочность и радиационная повреждаемость коррозионно-стойких сталей и сплавов. − Челябинск: Металлургия, 1988.

6. Применение алюминиевых сплавов: Справочник / Б.М. Альтман, А.Ф. Белов, И.В. Горынин и др. − М.: Металлругия, 1985.

7. Радиационное повреждение стали корпусов водо-водяных реакторов / Н.Н. Алсксеенко, А.Д. Амаев, И.В. Горынин и др. / Под общ. ред. И.В. Горынина. − М.: Энергоиздат, 1981.

8. Рудман П.С., Стринджер Дж., Джаффи Р.И. Устойчивость фаз в металлах и сплавах / Пер. с англ. − М.: Мир, 1970. − 408 с.

9. Самойлов А.Г., Волков В.С., Солонин М.И. Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов: Учебник для вузов. − М.: Энергоатомиздат, 1996. − 400 с.

10. Седов В.М., Заводский М.И. Технико-экономические основы разработки ядерной энергетики: Учебное пособие. − Л.: Изд-во Ленингр. техн. ин-та, 1985.

11. Структура и радиационная повреждаемость конструкционных материалов. Ч 2. / Под ред. И.В. Горынина и А.М. Паршина. − М.: Металлургия, 1996. − 168 с.

12. Уайэтт Л.М. Материалы ядерных энергетических установок / Пер. с англ. − М.: Атомиздат, 1979.

13. Фрост Б. Твэлы ядерных реакторов / Пер. с англ. − М.: Энергоатомиздат, 1986. − 248 с.

14. Химическая технология теплоносителей ядерных энергетических установок: Учебное пособие / В.М. Седов, А.Ф. Нечаев, В.А. Доильницын и др. − М.: Энергоатомиздат, 1985.

15. Химушин Ф.Ф. Жаропрочные стали и сплавы. − М.: Металлургия, 1969. − 752 с.

16. Цыканов В.А., Давыдов Е.Ф. Радиационная стойкость тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. − М.: Атомиздат, 1977.

17. Чернов И.И., Калашников А.Н., Калин Б.А., Бинюкова С.Ю. Материалы с особыми физическими свойствами: Учебное пособие. − М.: МИФИ, 2005. − 224 с.

18. Чернов И.И., Калин Б.А., Бинюкова С.Ю., Стальцов М.С. Влияние легирования и термической обработки на структуру и свойства циркония: Учебное пособие. − М.: МИФИ, 2007. − 84 с.

19. Ягодин Г.А., Раков Э.Г., Третьякова Л.Г. Химия и химическая технология в решении глобальных проблем. − М.: Химия, 1988.

20. Ядерные энергетические установки / Б.Г. Ганчев, Л.Л. Калишевский, Р.С. Демешев и др. / Под общ. ред. Н.А. Доллежаля. − 2-е изд. − М.: Энергоатомиздат, 1991.

1. **Перечень вопросов к кандидатскому экзамену по теме диссертации**

**«**Исследование физико-химических свойств малоактивируемых конструкционных сплавов на основе ванадия для ядерной энергетики**»**

1. Образование радиационных точечных дефектов и их взаимодействие друг с другом и атомами растворенных элементов.
2. Диффузионные свойства точечных дефектов и растворенных элементов в чистых металлах и сплавах.
3. Накопление и отжиг радиационных дефектов в чистых металлах и сплавах.
4. Радиационно-стимулированные фазовые изменения в сплавах.
5. Радиационно-стойкие стали и сплавы с ускоренным спадом наведенной радиоактивности.
6. Основные закономерности и механизмы радиационного повреждения конструкционных металлических материалов.

**Литература**

1. Кирсанов В.В., Суворов А.Л., Трушин Ю.В. Процессы радиационного дефектообразования в металлах. М.: Энергоиздат, 1985, 272 с.
2. Дамаск А., Динс Дж. Точечные дефекты в металлах. М.: Мир, 1966, 291 с.
3. Волобуев А.В., Ганн В.В., Неклюдов И.М., Петрусенко Ю.Т., Слепцов А.Н. В кн.: Радиационное материаловедение. Харьков, 1990, т.2. с. 58
4. Томсон М. Дефекты и радиационные повреждения в металлах. М.: Мир, 1971, 367 с.
5. Конобеевский С.Т. Действие облучения на материалы. М.: Атомиздат, 1967, 401 с.