

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО
Проректор по учебной работе и
довузовской подготовке
А.А. Воронов

**Программа государственной итоговой аттестации
Подготовка к сдаче и сдача государственного экзамена по физике**

по направлению: Прикладные математика и физика
профиль подготовки: Физика перспективных технологий: электроника и квантовые
Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики
курс: 3
квалификация: бакалавр

семестр: 5 (Осенний)

Программу составил: А.Д. Калашников, канд. физ.-мат. наук, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры общей физики 20.05.2020

1. Цели и задачи

Цели

Целью государственного экзамена по физике является установление уровня подготовки обучающегося по дисциплинам общей физики и соответствия результатов освоения обучающимся образовательной программы требованиям образовательного стандарта.

Задачи

- оценка степени освоения обучающимися основных положений следующих дисциплин: «Общая физика. Механика», «Общая физика. Термодинамика и молекулярная физика», «Общая физика. Электричество и магнетизм», «Общая физика. Оптика», «Общая физика. Квантовая физика»;
- оценка умения применять полученные знания для решения конкретных задач.

2. Перечень компетенций, уровень сформированности которых оценивается при проведении государственного экзамена

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.2 Находит, критически анализирует и выбирает информацию, необходимую для решения поставленной задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
	УК-1.4 Грамотно, логично, аргументированно формирует собственные суждения и оценки
	УК-1.5 Определяет и оценивает практические последствия возможных вариантов решения задачи
УК-6 Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни	УК-6.2 Способен планировать самостоятельную деятельность в решении профессиональных задач; подвергать критическому анализу проделанную работу; находить и творчески использовать имеющийся опыт в соответствии с задачами саморазвития

3. Перечень примерных вопросов, выносимых на государственный экзамен

Механика

Законы Ньютона. Движение тел в инерциальных и неинерциальных системах отсчета.

Принцип относительности Галилея и принцип относительности Эйнштейна. Преобразования Лоренца. Инвариантность интервала.

Законы сохранения энергии и импульса в классической механике. Упругие и неупругие столкновения.

Уравнение движения релятивистской частицы под действием внешней силы. Импульс и энергия релятивистской частицы.

Закон всемирного тяготения и законы Кеплера. Движение тел в поле тяготения.

Закон сохранения момента импульса. Уравнение моментов. Вращение твердого тела вокруг неподвижной оси. Гироскопы.

Течение идеальной жидкости. Уравнение непрерывности. Уравнение Бернулли.

Закон вязкого течения жидкости. Формула Пуазейля. Число Рейнольдса, его физический смысл.

Упругие деформации. Модуль Юнга и коэффициент Пуассона. Энергия упругой деформации.

Термодинамика и молекулярная физика

Уравнение состояния идеального газа, его объяснение на основе молекулярно-кинетической теории. Уравнение неидеального газа Ван-дер-Ваальса.

Квазистатистические процессы. Первое начало термодинамики. Количество теплоты и работа. Внутренняя энергия. Энтальпия.

Второе начало термодинамики. Цикл Карно. Энтропия и закон ее возрастания. Энтропия идеального газа. Статистический смысл энтропии.

Термодинамические потенциалы. Условия равновесия термодинамических систем.

Распределения Максвелла и Больцмана.

Теплоемкость. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы. Зависимость теплоемкости газов от температуры.

Фазовые переходы. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Диаграммы состояний.

Явления переноса: диффузия, теплопроводность, вязкость. Коэффициенты переноса в газах. Уравнение стационарной теплопроводности.

Поверхностное натяжение. Формула Лапласа. Свободная энергия и внутренняя энергия поверхности.

Флуктуации в термодинамических системах.

Броуновское движение, закон Эйнштейна-Смолуховского. Связь диффузии и подвижности (соотношение Эйнштейна).

Электричество и магнетизм

Закон Кулона. Теорема Гаусса в дифференциальной и интегральной формах. Теорема о циркуляции для статического электрического поля. Потенциал. Уравнение Пуассона.

Электростатическое поле в веществе. Вектор поляризации, электрическая индукция. Граничные условия для векторов E и D .

Магнитное поле постоянных токов в вакууме. Основные уравнения магнитостатики в вакууме. Закон Био-Савара. Сила Ампера. Сила Лоренца.

Магнитное поле в веществе. Основные уравнения магнитостатики в веществе. Граничные условия для векторов B и H .

Закон Ома в цепи постоянного тока. Переходные процессы в электрических цепях.

Электромагнитная индукция в движущихся и неподвижных проводниках. ЭДС индукции. Само-и взаимоиנדукция. Теорема взаимности.

Система уравнений Максвелла в интегральной и дифференциальной формах. Ток смещения. Материальные уравнения.

Закон сохранения энергии для электромагнитного поля. Вектор Пойнтинга. Импульс электромагнитного поля.

Квазистационарные токи. Свободные и вынужденные колебания в электрических цепях. Явление резонанса. Добротность колебательного контура, ее энергетический смысл.

Спектральное разложение электрических сигналов. Спектры колебаний, модулированных по амплитуде и фазе.

Электрические флуктуации. Дробовой и тепловой шум. Предел чувствительности электроизмерительных приборов.

Электромагнитные волны. Волновое уравнение. Уравнение Гельмгольца.

Электромагнитные волны в волноводах. Критическая частота. Объемные резонаторы.

Плазма. Плазменная частота. Диэлектрическая проницаемость плазмы. Дебаевский радиус.

Оптика

Интерференция волн. Временная и пространственная когерентность. Соотношение неопределенностей.

Принцип Гюйгенса-Френеля. Зоны Френеля. Дифракция Френеля и Фраунгофера. Границы применимости геометрической оптики.

Спектральные приборы (призма, дифракционная решетка, интерферометр Фабри-Перо) и их основные характеристики.

Дифракционный предел разрешения оптических и спектральных приборов. Критерий Рэлея.

Пространственное фурье-преобразование в оптике. Дифракция на синусоидальных решетках. Теория Аббе формирования изображения.

Принципы голографии. Голограмма Габора. Голограмма с наклонным опорным пучком. Объемные голограммы.

Волновой пакет. Фазовая и групповая скорости. Формула Рэлея. Классическая теория дисперсии. Нормальная и аномальная дисперсии.

Поляризация света. Угол Брюстера. Оптические явления в одноосных кристаллах.

Дифракция рентгеновских лучей. Формула Брэгга-Вульфа. Показатель преломления вещества для рентгеновских лучей.

Квантовая физика

Квантовая природа света. Внешний фотоэффект. Уравнение Эйнштейна. Эффект Комптона.

Спонтанное и вынужденное излучение. Инверсная заселенность уровней. Принцип работы лазера.

Излучение абсолютно черного тела. Формула Планка, законы Вина и Стефана-Больцмана.

Корпускулярно-волновой дуализм. Волны де Бройля. Опыты Девиссона-Джермера и Томсона по дифракции электронов.

Волновая функция. Операторы координаты и импульса. Средние значения физических величин. Соотношение неопределенности для координаты и импульса. Уравнение Шредингера.

Строение водородоподобного атома. Уровни энергии и кратность их вырождения. Спектр излучения атома водорода.

Опыты Штерна и Герлаха. Спин электрона. Орбитальный и спиновый магнитные моменты электрона.

Тождественность частиц. Симметрия волновой функции относительно перестановки частиц. Бозоны и фермионы. Принцип Паули. Электронная структура атомов. Таблица Менделеева.

Тонкая и сверхтонкая структуры оптических спектров. Правила отбора при поглощении и испускании фотонов атомами.

Эффект Зеемана в слабых магнитных полях.

Эффект Зеемана в сильных магнитных полях.

Ядерный и электронный магнитный резонансы.

Виды распадов. Закон радиоактивного распада. Период полураспада и время жизни.

Туннелирование частиц сквозь потенциальный барьер. Альфа-распад. Закон Гейгера-Нэттола и его объяснение.

Виды бета-распадов. Объяснение непрерывности энергетического спектра электронов распада. Нейтрино.

Ядерные реакции. Составное ядро. Сечение нерезонансных реакций. Закон Бете.

Резонансные ядерные реакции, формула Брейта-Вигнера. Упругий и неупругие каналы реакции.

Деление ядер под действием нейтронов. Принцип работы ядерного реактора на тепловых нейтронах.

Соотношение неопределенностей для энергии и времени. Оценка времени жизни виртуальных частиц, радиусов сильного и слабого взаимодействий.

Фундаментальные взаимодействия и фундаментальные частицы (лептоны, кварки и переносчики взаимодействий). Кварковая структура адронов.

4. Порядок сдачи государственного экзамена

К государственному экзамену по физике, допускается обучающийся, освоивший дисциплины по блоку «Общая физика» и не имеющий академических задолженностей по этим дисциплинам.

Перед государственным экзаменом проводятся консультации обучающихся по вопросам программы государственного экзамена.

Государственный экзамен по физике состоит из письменной и устной частей.

Письменная часть содержит от 5 до 9 задач, на решение которых отводится 4 часа. По итогам проверки письменной работы выставляется оценка за письменную часть по 10-балльной шкале. К устной части экзамена студент готовит вопрос по выбору.

Устная часть экзамена включает в себя анализ письменной работы, ответ студента на вопрос по выбору и на вопросы экзаменационного билета. Экзаменационные билеты устной части содержат один из вопросов дисциплин по блоку «Общая физика» в соответствии с приведенным перечнем и задачу. На подготовку ответа устного экзамена студенту отводится 1 час, на ответ — около 30 минут.

При подготовке к ответу и во время ответа обучающийся может пользоваться доской в аудитории, подготовленными материалами (презентация, демонстрационный эксперимент и т.д.) к вопросу по выбору.

После завершения устного ответа члены ГЭК могут задать дополнительные и уточняющие вопросы.

В процессе подготовки к ответу экзаменуемому разрешается пользоваться данной программой ГИА и литературой, указанной в перечне п.6.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для проведения государственного экзамена

- аудитория для проведения консультаций и аттестационного испытания, оснащенная рабочими местами для обучающихся и государственной экзаменационной комиссии;
- доска, стенды для крепления плакатов;
- мультимедийное оборудование для презентаций.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

Перечень рекомендуемой литературы

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 1. Механика. — М.: Физматлит, 2003.
2. Кингсеп А.С., Локшин Г.Р., Ольхов О.А. Основы физики. Курс общей физики. Т. 1. Механика, электричество и магнетизм, колебания и волны, волновая оптика. — М.: Физматлит, 2001
3. Кириченко Н.А., Крымский К.М. Общая физика. Механика: учебное пособие. — М.: МФТИ, 2013.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. — М.: Физматлит, 2006.
5. Белонучкин В.Е. Краткий курс термодинамики. — М.: МФТИ, 2010.
6. Кириченко Н.А. Термодинамика, статистическая молекулярная физика. — М.: Физматкнига, 2012.
7. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3. — М.: Наука, 1996.
8. Кингсеп А.С., Локшин Г.Р., Ольхов О.А. Основы физики. Курс общей физики. Т. 1. Механика, электричество и магнетизм, колебания и волны, волновая оптика. — М.: Физматлит, 2001
9. Кириченко Н.А. Электричество и магнетизм. — М.: МФТИ, 2011.
10. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. Т. 4. — М.: Наука, 1996.
11. Бутиков Е.И. Оптика. — М.: Высшая школа, 1986.
12. Ципенюк Ю.М. Квантовая микро- и макрофизика. — М.: Физматкнига, 2006.
13. Белонучкин В.Е., Заикин Д.А., Ципенюк Ю.М. Основы физики. Т. II под ред. Ю.М. Ципенюка. — М.: Физматлит, 2006.
14. Карлов Н.В., Кириченко Н.А. Начальные главы квантовой механики. — М.: Физматлит, 2006.
15. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Атомная и ядерная физика. Т.5. — М.: Физматлит, 2008.

Дополнительная литература

7. Рекомендации обучающимся по подготовке к государственному экзамену

При подготовке к письменной части государственного экзамена обучающимся рекомендуется решить несколько экзаменационных контрольных работ государственного экзамена за предшествующие годы. Эти варианты размещены на сайте кафедры общей физики МФТИ.

При этом студенту рекомендуется выявить типы задач, в которых у него возникают трудности и обратить особое внимание на эти типы задач при подготовке к экзамену. Если возникают вопросы, которые студент не может самостоятельно решить с помощью рекомендуемой литературы, эти вопросы рекомендуется задать на консультации, проводимой преподавателем кафедры по соответствующей дисциплине.

При подготовке к устной части государственного экзамена обучающимся рекомендуется вспомнить темы дисциплин общей физики, входящие в программу устной части государственного экзамена, используя при необходимости конспекты лекций и рекомендуемую литературу. После повторения каждой темы обучающемуся рекомендуется самостоятельно написать формулы, содержащиеся в программе устной части государственного экзамена, и их краткий вывод без использования литературы и вспомогательных средств. Если это не удастся, то рекомендуется повторить данную процедуру.

8. Методика и критерии оценки государственного экзамена

Результаты сдачи государственного экзамена определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешную сдачу государственного экзамена.

Критерии оценок за письменную часть государственного экзамена:

За каждую задачу установлено определенное количество баллов, указанное в экзаменационном задании. Для получения за письменную часть оценки «отлично» студенту, как правило, необходимо набрать не менее 70–80% полной суммы баллов, для получения оценки «хорошо» — не менее 40–50%, для получения оценки «удовлетворительно» — не менее 20–25%.

Критерии оценок за устную часть государственного экзамена:

отлично (10) – правильный, четкий и уверенный ответ на оба вопроса билета и дополнительные вопросы;

отлично (9) – даны правильные ответы на оба вопроса билета и дополнительные вопросы с незначительными неточностями;

отлично (8) – даны ответы на оба вопроса билета и дополнительные вопросы после небольших исправлений и наводящих вопросов экзаменаторов;

хорошо (7) – даны ответы на оба вопроса билета, но нет верного ответа на один из дополнительных вопросов;

хорошо (6) – есть недочеты в ответе на один из вопросов билета и нет верного ответа на один из дополнительных вопросов;

хорошо (5) – есть недочеты в ответах на оба вопроса билета и нет верного ответа на один из дополнительных вопросов;

удовлетворительно (4) – есть недочеты в ответах на оба вопроса билета или нет ответа ни на один из дополнительных вопросов;

удовлетворительно (3) – нет ответа на один из вопросов билета, но есть ответы на дополнительные вопросы (возможно с недочетами);

неудовлетворительно (2) – нет ответа на один из вопросов билета и на дополнительные вопросы;

неудовлетворительно (1) – нет ответа ни на один из вопросов билета.

Итоговая оценка за государственный экзамен по физике определяется государственной экзаменационной комиссией с учетом оценки обучающегося за устную часть государственного экзамена и оценки за письменную часть государственного экзамена.

9. Особенности проведения государственной итоговой аттестации для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья

Для обучающихся из числа инвалидов государственная итоговая аттестация проводится с учетом особенностей их психофизического развития, их индивидуальных возможностей и состояния здоровья (далее – индивидуальные особенности).

10.1. При проведении ГИА обеспечивается соблюдение следующих общих требований:

- проведение государственной итоговой аттестации для инвалидов в одной аудитории совместно с обучающимися, не имеющими ограниченных возможностей здоровья, если это не создает трудностей для обучающихся при прохождении ГИА;
- присутствие в аудитории ассистента (ассистентов), оказывающего обучающимся инвалидам необходимую техническую помощь с учетом их индивидуальных особенностей (занять рабочее место, передвигаться, прочитать и оформить задание, общаться с членами ГЭК);
- пользование необходимыми обучающимся инвалидам техническими средствами при прохождении ГИА с учетом их индивидуальных особенностей;
- обеспечение возможности беспрепятственного доступа обучающихся инвалидов в аудитории, туалетные и другие помещения, а также их пребывания в указанных помещениях.

10.2. По письменному заявлению обучающегося инвалида продолжительность выступления обучающегося при защите выпускной квалификационной работы – не более чем на 15 минут.

10.3. Обучающийся инвалид не позднее, чем за 3 месяца до начала проведения ГИА подает письменное заявление о необходимости создания для него специальных условий при проведении государственных аттестационных испытаний с указанием особенностей его психофизического развития, индивидуальных возможностей и состояния здоровья. К заявлению прилагаются документы, подтверждающие наличие у обучающегося индивидуальных особенностей (при отсутствии указанных документов в дирекции института).

В заявлении обучающийся указывает на необходимость (отсутствие необходимости) присутствия ассистента на государственном аттестационном испытании, необходимость (отсутствие необходимости) увеличения продолжительности выступления при защите выпускной квалификационной работы по отношению к установленной продолжительности.

10. Примеры контрольных заданий, билетов

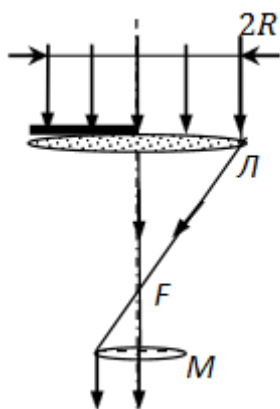
Примеры заданий приведены в приложении

- Нобелевская премия по физике за 2019 г. присуждена за открытие несветящихся спутников (экзопланет) у звёзд. Экзопланеты могут быть обнаружены с помощью доплеровского смещения спектра излучения звезды за счёт движения вокруг общего центра масс. Оценить, могут ли экзопланетные физики обнаружить наличие у Солнца спутника (планеты Юпитер), если они используют спектрометр с разрешающей способностью $R = 4 \cdot 10^7$? Период обращения Юпитера $T_{\text{Ю}} = 11,9$ года, масса $M_{\text{Ю}} = 1,8 \cdot 10^{30}$ г. Масса Солнца $M_{\text{С}} = 2 \cdot 10^{33}$ г. Считать, что наблюдение ведётся в плоскости движения системы Солнце–Юпитер.
- Сосуд постоянного объема разделён подвижной теплоизолирующей перегородкой на две части, в каждой из которых содержится по одному молю идеального одноатомного газа. В начальный момент температуры газа в объёмах частей равны T_0 и αT_0 , где $\alpha = 7$, а перегородка находится в механическом равновесии. Найти максимальную работу, которую можно получить от того или иного внешнего устройства, использующего данный сосуд как единственный источник энергии.
- В одном из экспериментов, нацеленных на создание управляемого термоядерного синтеза, ток $I_0 = 2$ МА пропускается по находящейся в вакууме полый тонкостенной цилиндрической оболочке радиуса $R_0 = 1$ см вдоль её образующей. В результате оболочка начинает сжиматься симметрично к оси системы. Найти изменение кинетической энергии оболочки на единицу её длины к моменту, когда она сожмётся до $R_1 = 10^{-2} R_0$. Толщину оболочки δ считать малой на протяжении всего процесса: $\delta \ll R_1$.
- В практических задачах рентгеновской оптики было предложено использовать собирающие линзы в виде сферических полостей внутри металлических блоков. Оценить в приближении параксиальной оптики минимальный размер пятна d , в который можно сфокусировать плоскопараллельный пучок рентгеновского излучения с энергией кванта $E_{\gamma} = 14$ кэВ при помощи такой линзы, если радиус сферической полости, сделанной в алюминии, составляет $R = 0,3$ мм. Плотность алюминия $\rho = 2,7$ г/см³.
- При β^- -распаде ядра ^{137}Cs разность энергий покоя материнского и дочернего ядер ΔE составила две энергии покоя электрона. Электрон и антинейтрино разлетелись под углом $\alpha = 120^\circ$. Дочернее ядро начало двигаться под углом $\varphi = 150^\circ$ к направлению вылета электрона. Найти энергию вылетевшего антинейтрино в единицах энергии покоя электрона. Считать антинейтрино безмассовой частицей.
- Современные железнодорожные пути укладывают без стыков, соединяя концы рельсов сварными швами. Рельсы прочно прикреплены к шпалам, вкопанным в гравий. При температуре $t_1 = +30^\circ\text{C}$ напряжение в рельсах отсутствует, а при понижении температуры рельсы оказываются в натянутом состоянии. Каждая шпала способна выдержать без смещения горизонтальное усилие до $F_{\text{max}} = 5$ кН, а при большем усилии «ползёт», так что сопротивление грунта остаётся равным F_{max} . Найти смещение Δl конца длинного прямолинейного участка пути при $t_2 = -30^\circ\text{C}$. Характеристики материала рельсов: плотность $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³, модуль Юнга $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент линейного теплового расширения $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹. Погонная масса рельса $m = 65$ кг/м, расстояние между шпалами $d = 50$ см.
- В опыте по демонстрации окологривитических состояний нагревается запаянная ампула, заполненная жидким эфиром и его парами. В начальном состоянии жидкость занимает 30% объёма ампулы, а её плотность $\rho_{\text{ж}}(T_0) = 0,4$ г/см³. При нагревании граница раздела «жидкость–пар» опустилась и исчезла, так что в пробирке остался только пар. При этом плотность жидкости приблизилась к $\rho_{\text{ж}}(T) = 0,285$ г/см³, а плотность пара возросла втрое: $\rho_{\text{п}}(T) = 3\rho_{\text{п}}(T_0)$. Найти температуру T системы в этот момент. Критическая температура эфира $T_{\text{кр}} = 467$

K , критическая плотность $\rho_{\text{кр}} = 0,265 \text{ г/см}^3$. Считать, что и в жидком и в газообразном состояниях эфир описывается моделью Ван-дер-Ваальса.

Указание: использовать приведённое уравнение Ван-дер-Ваальса.

- На замкнутый контур из цилиндрических трубок, в котором может циркулировать ферромагнитная жидкость (ФМЖ), надет постоянный магнит. Вблизи магнита создан перепад температур, так что с одной его стороны температура ниже точки Кюри (температуры фазового перехода между ферромагнитным и парамагнитным состояниями), а с другой — выше. Область перехода соответствует центру магнита, где напряжённость поля $H = 100 \text{ Э}$. Считая течение ламинарным, оценить установившуюся скорость ФМЖ, имеющей вязкость $\eta = 10 \text{ г/(см}\cdot\text{с)}$. Длина контура $L = 1 \text{ м}$, сечение трубки $S = 1 \text{ см}^2$. Восприимчивость ФМЖ в ферромагнитном состоянии считать постоянной: $\chi = 200$ (ед. СГС).
- Нобелевская премия по физике 2018 г. присуждена А. Эшкину за создание «лазерного пинцета» — устройства, позволяющего удерживать и перемещать прозрачные микроскопические объекты с помощью света. Параллельный пучок света от лазера проходит через собирающую линзу L и затем падает на микрочастицу M , которую можно также читать собирающей линзой. Точка F — их общий фокус (см. рис.). Интенсивность света в пучке $I = 1 \text{ мВт/см}^2$, радиус пучка $R = 1 \text{ см}$, фокусное расстояние линзы L равно $F = 10 \text{ см}$. Для создания поперечной к направлению пучка силы f_{\perp} , действующей на частицу, левая половина линзы L перекрывается диафрагмой. Пренебрегая дифракционными эффектами, найти величину и направление f_{\perp} , обусловленной преломлением света. За какое время под действием только этой силы частица сместится на расстояние порядка своего размера $l \sim 30 \text{ мкм}$, если её масса $m \sim 10 \text{ нг}$? Поглощением и отражением света на поверхностях линз пренебречь.



- Для α -распада чётно-чётных ядер период полураспада $T_{1/2}$ (в секундах) зависит от энергии α -частицы E_{α} (в МэВ) и заряда дочернего ядра Z по закону Гейгера–Нэттола: $\lg T_{1/2} = 9,54 \cdot \frac{Z^{0,6}}{\sqrt{E_{\alpha}}} - 51,37$. Используя капельную модель ядра, найти период полураспада ядра тория ${}^{226}_{90}\text{Th}$, если для ядра радия ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ $T_{1/2} = 1600 \text{ лет}$. Для кулоновского и симметричного коэффициентов в формуле Вайцеккера принять значения $C_{\text{кул}} = 0,71 \text{ МэВ}$ и $C_{\text{сим}} = 23,7 \text{ МэВ}$.