

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 Автоматизированные системы контроля радиационной об- становки	11
1.1 Необходимость АСКРО	11
1.2 Цели и задачи АСКРО	12
1.3 АСКРО на различных этапах развития атомной энергетики .	12
1.4 Состав и принцип работы АСКРО	13
1.5 Заключение обзора АСКРО	17
ГЛАВА 2 Модель активации теплоносителя первого контура	18
2.1 Миграция радионуклидов на АЭС	18
2.2 Образование газообразных радионуклидов АЭС	20
2.2.1 Инертные радиоактивные газы	21
2.2.2 Изотопы йода	23
2.2.3 Аэрозоли	24
2.2.4 Активационные газы	25
2.2.5 Углерод	26
2.2.6 Тритий	27
2.3 Активация теплоносителя радионуклидами, выходящими из под оболочки ТВЭЛов	28
2.4 Образование радионуклидов в теплоносителе под действи- ем облучения	33
2.4.1 Расчетная модель	33
2.4.2 Расчет концентрации радионуклида N-16	34
2.4.3 Расчет концентрации радионуклида Ar-41	35
2.4.4 Расчет концентрации радионуклида H-3	35
2.4.5 Расчет концентрации радионуклида C-14	36
2.5 Заключение моделирования активации теплоносителя пер- вого контура	37
ГЛАВА 3 Разработка модуля анализа свойств местности, прилега- ющей к АЭС	39
3.1 Модель переноса радиоактивных примесей в атмосфере ...	39
3.2 Необходимость анализа свойств местности	40

3.3	Принцип анализа свойств местности	40
3.4	Разработка программного кода анализа свойств местности .	42
3.5	Заключение разработки модуля анализа свойств местности, прилегающей к АЭС	43
ГЛАВА 4 Разработка расчетной сетки и аппроксимация свойств мест-		
	ности на узлы сетки	44
4.1	Расчетная сетка в методе конечных элементов	44
4.2	Создание расчетной сетки	45
4.3	Аппроксимация свойств местности на узлы расчетной сетки	47
4.4	Заключение разработки расчетной сетки и аппроксимации свойств местности на её узлы.....	48
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		49
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ		51
ПРИЛОЖЕНИЕ А		54
ПРИЛОЖЕНИЕ Б		55
ПРИЛОЖЕНИЕ В		56
ПРИЛОЖЕНИЕ Г		59
ПРИЛОЖЕНИЕ Д		60

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЗ	активная зона
АЭС	атомная электростанция
АСКРО	автоматизированная система контроля радиационной обстановки
ВВЭР	водо-водяной энергетический реактор
ИРГ	инертные радиоактивные газы
ОИАЭ	объекты использования атомной энергии
РБМК	реактор большой мощности канальный
ТВЭЛ	тепловыделяющий элемент
ЭВМ	электронно - вычислительная машина

ВВЕДЕНИЕ

Производственная практика проходила в Национальном Исследовательском Ядерном Университете «МИФИ» на кафедре № 5.

Цель производственной практики. Целями производственной практики являются разработка модели активации теплоносителя первого контура реакторной установки, разработка модуля генерации расчетной сетки и аппроксимации свойств местности на узлы расчетной сетки. В связи с поставленной целью в ходе работы решаются следующие задачи:

- изучение литературы, посвященной активации теплоносителя первого контура;
- разработка модели образования радиоактивных нуклидов в топливе ядерного реактора с дальнейшим переходом в теплоноситель первого контура;
- разработка модуля анализа свойств местности, прилегающей к АЭС, по данным топологических карт;
- разработка расчетной сетки, описывающей прилегающую к АЭС местность;
- аппроксимация свойств местности на узлы расчетной сетки.

Обзор литературы. Проведем обзор имеющейся литературы в соответствии с поставленными задачами.

При изучении радиоактивных нуклидов, которые образуются в ядерном реакторе, важно учитывать не только продукты реакции деления (n, f) , но и радионуклиды, образующиеся в результате реакций превращения типа (n, γ) , $(n, 2n)$ на радиоактивных и стабильных изотопах в ядерном реакторе. «Каждый нуклид, находящийся в работающем ядерном реакторе, в общем случае испытывает, кроме радиоактивного распада, ряд превращений, обусловленных взаимодействием с нейтронами: деление (n, f) , радиационный захват (n, γ) , реакцию $(n, 2n)$ и т.д.» [1, с. 6]. Авторы [1] выделяют более 650 радиоактивных нуклидов, массовые числа которых лежат в интервале от 72 до 166, и около 60 актиноидов, которые генерируются в процессе работы ядерного реактора.

Радионуклидный состав и радиационные характеристики продуктов реакций деления и превращения в большинстве своем зависят от типа ядерного реактора и его особенностей. В источнике [2] описываются радионуклиды, образующиеся в ядерных реакторах типа ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор) и РБМК (реактор большой мощности канальный), а так же радиационные

характеристики этих нуклидов. Основными радионуклидами, образующимися в топливе во время работы ядерного реактора и играющими существенную роль в создании радиационной обстановки вблизи АЭС, являются изотопы иода (I), а также ИРГ (инертные радиоактивные газы), а именно криптон (Kr) и ксенон (Xe).

Согласно [2–4], помимо образования радиоактивных нуклидов в ТВЭЛах (тепловыделяющий элемент), в ядерном реакторе присутствуют радионуклиды активационного и коррозионного происхождения. Как правило, такие нуклиды накапливаются в системе теплоносителя. Активность этой системы обусловлена следующими факторами:

- собственная активность системы теплоносителя образуется из-за активации нейтронами ядер теплоносителя и входящих в него естественных примесей;
- активность продуктов коррозии металлов (процесс коррозии в ядерном реакторе происходит на поверхности конструктивных материалов АЗ (активная зона) и в системе теплоносителя);
- активность продуктов деления и актиноидов, проникающих через поврежденную или негерметичную оболочку ТВЭЛов.

Для реакторов, охлаждаемых легкой водой, основной вклад как по удельной активности, так и по мощности дозы γ - излучения среди нуклидов активационного происхождения является радионуклид ^{16}N , который образуется в активной зоне в результате реакции $^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$. Эта реакция является пороговой и проходит при энергии нейтронов выше 10 МэВ. Также не менее важным нуклидом активационного происхождения является нуклид ^{41}Ar , образуемый в реакции $^{40}\text{Ar}(n, \gamma)^{41}\text{Ar}$.

При моделировании процесса переноса радиоактивных примесей в атмосфере необходимо учитывать множество факторов и метеорологических особенностей переноса веществ. «Примесью в метеорологии обычно называют вещества, удаляемые в атмосферу в виде газов и аэрозолей в процессе выброса» [2, с. 52]. После попадания в атмосферу такие вещества распространяются в результате ветрового переноса и турбулентной диффузии.

Ветровой перенос примесей при их непрерывном истечении из источника создает своего рода струю выброса, в то время как при слабом или отсутствующем ветре вокруг источника выброса образуется облако примесей, обуслов-

ленное превашированием диффузии над ветровым переносом. Турбулентность диффузии в атмосфере обусловлена наличием в атмосфере беспорядочных завихрений различных размеров и форм, источником которых являются силы трения, возникающие при взаимодействии ветрового потока с землей, а так же потоки воздуха, распространяющиеся в вертикальном направлении вблизи нагретой поверхности. Взаимодействие атмосферных вихрей с облаком выброса зависит от отношения размеров вихрей и облака. [2]

При наличии ветра основной вклад в формировании турбулентности вносят силы трения ветровых потоков с поверхностью земли. Такой тип турбулентности называют *механической*. Интенсивность данного типа турбулентности зависит от скорости ветра, но в большей степени от рельефа поверхности земли. Влияние рельефа поверхности на рассеяние примесей описывают величиной, называемой шероховатостью подстилающей поверхности или высотой подстилающей поверхности z_0 . Согласно [5–7], высота подстилающей поверхности рассчитывается по вертикальному профилю ветра в приземном слое воздуха при нейтральных условиях, однако на практике при метеорологических расчетах используют табличные значения [8] (см. приложение А). Качественная картина поведения примеси при выбросе в атмосферу изображена на рисунке 1.

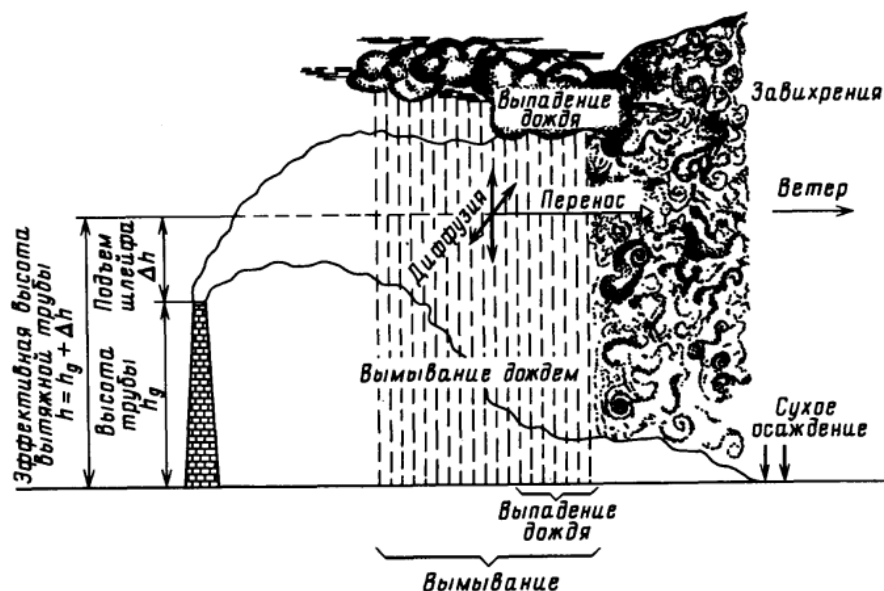


Рисунок 1 — Картина поведения примеси, выбрасываемой в атмосферу [2].

Согласно [2], математическое моделирование диффузии примесей в атмосфере рассматривается в двух вариантах:

- статистическое моделирование (Гаусова модель);

- решение дифференциальных уравнений переноса примесей.

Так как при рассмотрении турбулентной диффузии в атмосфере необходимо учитывать множество труднопредсказуемых факторов, учесть их все в рамках одной модели не представляется возможным. В связи с этим в современном мире существует множество различных моделей рассеяния примесей в атмосфере, каждая из которых обладает своими достоинствами и недостатками. Подробное описание существующих моделей рассеяния примесей изложены в источниках [5–7, 9–15].

Обзор программных средств. Проведем обзор программных средств, которые используются в ходе производственной практики.

На первых этапах выполнения преддипломной практики ставится задача разработки модели образования радиоактивных нуклидов в топливе ядерного реактора с дальнейшим переходом в теплоноситель первого контура, в результате которой будут получены концентрации радионуклидов в теплоносителе первого контура. Для расчета концентраций необходимо знать двухгрупповые микроскопические сечения реакций, приводящих к образованию радионуклидов. С целью расчета таких сечений используется программа UNK [29], позволяющая получить усредненные двухгрупповые сечения реакций. Программа UNK предназначена для расчета нейтронно-физических характеристик ячеек и ТВС ядерных реакторов различного типа. Библиотека ядерных данных программы включает около 300 изотопов и рассчитана с помощью программы NJOY из файлов оцененных данных ENDF/B-VI, JEFF-2.2 и JENDL-3.2.

Предполагается, что модель АСКРО будет основана на том, что распределение примесей в атмосфере описывается полуэмпирическим уравнением адвекции-диффузии [16]. Это уравнение является дифференциальным уравнением в частных производных.

Существует ряд методов, которые позволяют численно решать дифференциальные уравнения в частных производных. В данной работе для решения поставленных задач был выбран метод конечных элементов [17]. В основе метода конечных элементов лежит принцип деления исследуемой области на подобласти (рисунок 2). Метод обладает рядом преимуществ для рассматриваемой задачи:

- универсальность метода позволяет решать практически любые краевые задачи;

- метод позволяет решать дифференциальные уравнения для области любой сложности;
- в особенно важных подобластях есть возможность повысить плотность расчетной сетки для увеличения точности вычислений, в то время как в менее важных областях понизить плотность сетки для снижения затрат процессорного времени.

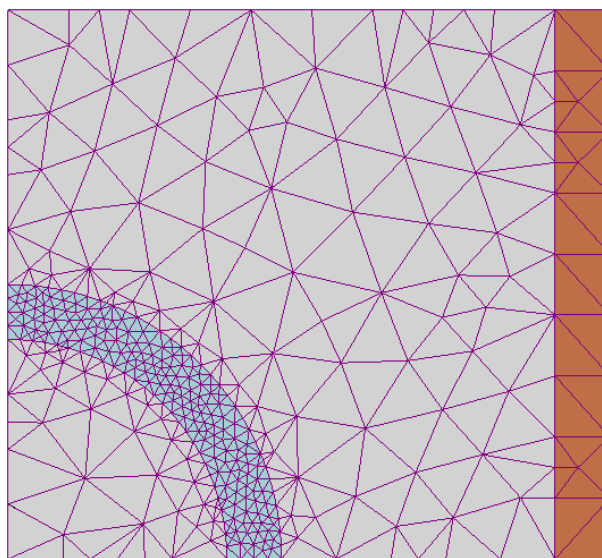


Рисунок 2 — Разбиение области на конечные элементы [22].

Для численного моделирования физических процессов, которые можно описать при помощи дифференциальных уравнений в частных производных, существует множество пакетов и программных средств. Одним из них является вычислительный пакет FEniCS [18]. Проект FEniCS разрабатывался группой исследователей из институтов со всего мира и имеет большой список возможностей, позволяющих автоматизировать решение дифференциальных уравнений. К достоинствам пакета FEniCS можно отнести:

- содержание обширной документации, большое сообщество и простой синтаксис, что обеспечивает низкий порог вхождения;
- возможность использования языков программирования Python и C++ для проведения расчетов;
- высокопроизводительная алгебра, параллельные вычисления, позволяющие снизить затраты процессорного времени;
- автоматическое решение дифференциальных уравнений;
- возможность расчета на 1, 2 и 3-х мерных сетках;
- простота установки пакета.

В качестве языка программирования для решения дифференциального уравнения методом конечных элементов был выбран язык Python [19]. Python - язык программирования высокого уровня. Синтаксис языка достаточно прост, что позволяет не отвлекаться от решаемой задачи на особенности языка и увеличивает скорость разработки. Python идеально подходит для программирования математических вычислений, так как обладает обширной библиотекой, предоставляющей массу возможностей, востребованных в вычислительных программах. Помимо стандартной библиотеки, Python допускает расширение возможностей как за счет своих собственных библиотек, так и за счет библиотек, созданных сторонними разработчиками. Одним из важнейших критериев выбора языка стала поддержка пакетом FEniCS языка программирования Python. К тому же, Python имеет возможность работать с такими языками, как Fortan и C++, которые активно используются в научных расчетах.

Создание расчетной сетки для решения дифференциального уравнения методом конечных элементов может стать непростой задачей, если требуется смоделировать 3-х мерную геометрию с повышением и понижением плотности сетки в различных областях. Для решения этой задачи существует программа gmsh [20], которая и используется в данной работе. Gmsh - программа, позволяющая генерировать расчетные сетки любой сложности. Основная цель gmsh - предоставить пользователю простой, быстрый и удобный инструмент для создания сетки с параметрическими входными данными.

Для того, чтобы задать параметры расчетной сетки, в gmsh присутствует модуль геометрии. При генерации расчетной сетки необходимо создать файл, содержащий команды на скриптовом языке gmsh, в котором детально описываются опорные точки и линии создаваемой геометрии. Для создания такого файла в ходе производственной практики используется сторонняя библиотека для языка python, которая называется pygmsh [21]. Эта библиотека является мощным инструментом, предоставляющим интерфейс для скриптового языка gmsh. Помимо удобных абстракций, библиотека содержит множество примеров создания расчетных сеток различной сложности. Более того, из за гибкости языка программирования python, имеется возможность параметризировать создание расчетной сетки и в дальнейшем при необходимости менять её параметры без изменения скриптового файла gmsh.

ГЛАВА 1

Автоматизированные системы контроля радиационной обстановки

1.1 Необходимость АСКРО

С каждым годом количество промышленных предприятий в мире стремительно увеличивается. К сожалению, увеличение количества промышленных предприятий сопровождается увеличением промышленных выбросов в атмосферу, из-за чего происходит загрязнение окружающей среды. Развитие производств, связанных с атомной энергетикой, также связано с проблемой загрязнения окружающей среды, особенно в случае радиационных аварий. В связи с этим, одной из главных задач атомной энергетики является повышение радиационной безопасности действующих АЭС, а также других ОИАЭ (объекты использования атомной энергии).

Даже при изолированной от окружающей среды технологии производства на предприятиях атомной энергетики, есть вероятность возникновения внештатных ситуаций, приводящих к радиоактивным выбросам и загрязнению окружающей среды. Примерами могут служить следующие радиационные аварии, произошедшие в прошлом:

- взрыв ёмкостей с радиоактивными отходами на химкомбинате «Маяк» (Челябинская область, СССР) 29 сентября 1957 г.;
- авария на заводе «Селлафилд» (Уиндскейл, Великобритания) 10 октября 1957 г.;
- авария на АЭС «Tree Mile Island» (штат Пенсильвания, США) 28 марта 1979 г.;
- авария на Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 г.;
- авария на заводе Токаимига (Токай, Япония) 30 сентября 1999 г.;
- авария на АЭС Фукусима-1 (Окума, Япония) 11 марта 2011 г.

Примеры выше показывают важность и актуальность задачи радиационного контроля внешней среды вблизи АЭС, осуществляемого автоматизированной системой контроля радиационной обстановки.

1.2 Цели и задачи АСКРО

Основной целью АСКРО является обеспечение руководства АЭС информацией, которая способствует минимизации последствий радиационной аварии на АЭС [16].

Задачами системы являются:

- оперативное обнаружение повышенного или аварийного выброса радиоактивных веществ;
- прогнозирование распространения радиоактивных выбросов, а также загрязнения окружающей среды;
- измерение значений мощности дозы фотонного излучения на прилегающей к АЭС местности;
- оценка дозовых нагрузок на персонал и население;
- выдача рекомендаций по принятию решений о защите населения.

Функционирование системы должно осуществляться в режиме реального времени (on-line), что достигается за счет автоматизированного сбора данных при помощи установленных датчиков. Впоследствии, на основе полученных данных осуществляется прогностические расчеты с использованием математических моделей распространения радиоактивных примесей в атмосфере.

1.3 АСКРО на различных этапах развития атомной энергетики

Развитие автоматизированных систем контроля радиационной обстановки происходило вместе с развитием средств контроля (таких как детекторы ионизирующих излучений, анализаторы спектра α , β , γ излучений), вычислительных мощностей ЭВМ, средств отображения, обработки, хранения и передачи информации, а также с развитием средств математического моделирования прогнозирования радиационной обстановки в атмосфере.

Автоматизированные системы контроля радиационной обстановки делятся на три основных поколения [16].

К первому поколению относятся системы, разрабатываемые до 1960-х годов. Эти системы были построены, в основном, на основе автоматических пороговых детекторов, задачей которых являлось сигнализирование при превышении допустимого уровня загрязнения окружающей среды. Системы контроля

первого поколения ориентировались в основном на осуществление контроля за загрязнением внешней среды, вызванным работой АЭС в штатном режиме. Причиной развития такого подхода служил тот факт, что радиоактивные выбросы и сбросы АЭС на столько малы за счет систем локализации и подавления активности, что они практически не изменяют радиационную обстановку внешней среды.

Системы второго поколения, развитие которых происходило в период с 1960-х до 1980-х годов, содержали в себе еще один важный компонент - вычислительный центр со специальным программным обеспечением, позволяющий на основе метеорологических данных атмосферы прогнозировать радиационные характеристики во внешней среде.

Автоматизированные системы контроля радиационной обстановки третьего поколения развиваются по сей день в условиях интенсивного совершенствования мощностей вычислительной техники. Из-за развития мощностей становится возможным использование более усовершенствованных математических моделей переноса радиоактивных примесей в атмосфере, которые позволяют проводить более точное и детальное прогнозирование радиационных характеристик внешней среды.

1.4 Состав и принцип работы АСКРО

Основу АСКРО составляют средства контроля. Входящие в состав системы средства контроля разделяют на метеорологические и радиационные [16].

Метеорологические средства контроля включают в себя совокупность датчиков метеопараметров, по показаниям которых определяют такие параметры, как направление ветра, продольная и поперечная составляющие скорости ветра, температура и влажность воздуха. На основе этих параметров также определяют состояние устойчивости атмосферы, которое оказывает большое влияние на распространение радиоактивных примесей в атмосфере. Кроме того, перечисленные параметры входят в уравнение адвекции-диффузии, которое используется при разработке модели АСКРО в текущей работе. Именно поэтому измерение указанных метеопараметров является необходимым для выполнения корректных расчетов, позволяющих прогнозировать радиационные характеристики внешней среды. Как правило, метеорологические параметры атмосферы изме-

ряют на метеоплощадках, на которых установлены метеорологические мачты, предназначенные для измерения скорости ветра и температуры.

Радиационный контроль во внешней среде осуществляется при помощи датчиков фотонного излучения (БДМГ-08Р3, БДМГ-08Р4, БДМГ-08Р5), располагающихся на промплощадке в пределах 1-1,5 км от АЭС. Датчики фотонного излучения имеют кабельную связь по специально выделенным линиям, а также по коммутируемым телефонным линиям. В случае расположения датчиков на расстоянии, превышающем 1,5 км, используются телефонная связь и радиосвязь на ультракоротких волнах по выделенному частотному диапазону.

Поскольку ведущим средством измерения АСКРО являются гамма-датчики, то при увеличении их количества на промплощадке вблизи АЭС повышается надежность и достоверность информации о радиационной обстановке. В то же время, каждый установленный датчик для нормальной работы требует основные и дополнительные линии связи электропитания, автономного питания, а также другое оборудование, стоимость которого является ключевым среди затрат на систему. В связи с этим ставится задача оптимизации количества датчиков фотонного излучения с экономической точки зрения и с точки зрения качества информации о радиационной обстановке вблизи АЭС.

Не менее важным параметром при решении уравнения переноса радиоактивных примесей в атмосфере является мощность выброса радиоактивных газоаэрозольных примесей, поступающих в атмосферу через вентиляционные трубы АЭС. Величину мощности выброса в атмосферу через вентиляционные трубы [Бк/с] определяют согласно формуле 1.1 [16]:

$$P = G \times A_{v0} \sum_{i=1}^N p_i \quad (1.1)$$

где:

G — секундный расход газоаэрозольных выбросов [$\text{м}^3/\text{с}$];

p_i — вес i -ого нуклида в смеси газоаэрозольных выбросов;

A_{v0} — полная объемная активность радионуклидов газоаэрозольных выбросов.

Для измерения мощности газоаэрозольных выбросов на АЭС используются специальные датчики. Примером такого вида датчиков может служить датчик, представляющий собой спаренные проточную и непроточную ионизационные

камеры одинаковых размеров и с одинаковым объемом рабочего пространства (рисунок 1.1). Проточная и непроточная камеры используются для измерения скорости воздушного потока по разности ионизационных токов в точке расположения детекторов. Кроме того, непроточная камера применяется для оценки мощности дозы фотонного излучения. Датчики мощности радиоактивных выбросов устанавливают в устье вентиляционных труб АЭС.

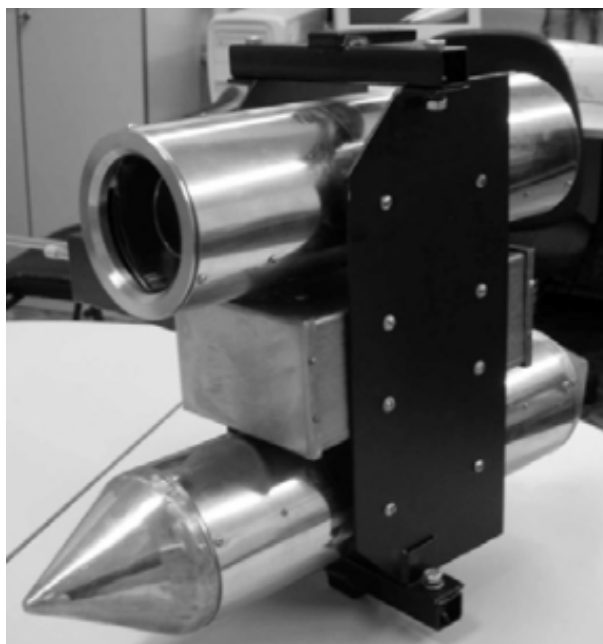


Рисунок 1.1 — Датчик мощности радиоактивных выбросов АЭС [16].

Исходные данные, полученные из вышеописанных средств контроля, передаются в расчетную математическую модель, представляющую собой набор специальных математических программ, установленных в вычислительных центрах и предназначенных для прогностических расчетов переноса радиоактивных примесей в атмосфере, а также оценки уровней радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности, дозовых нагрузок на персонал и население в условиях радиационных аварий.

На основе выходных характеристик расчетной модели принимается решение о необходимости эвакуации населения из загрязненного района вблизи АЭС. В случае необходимости проведения эвакуации решается задача выбора оптимального пути следования автотранспортных средств при эвакуации населения, а также количество автотранспортных средств, водителей и число рейсов, необходимое для проведения эвакуации.

Структурная схема АСКРО представлена на рисунке 1.2.

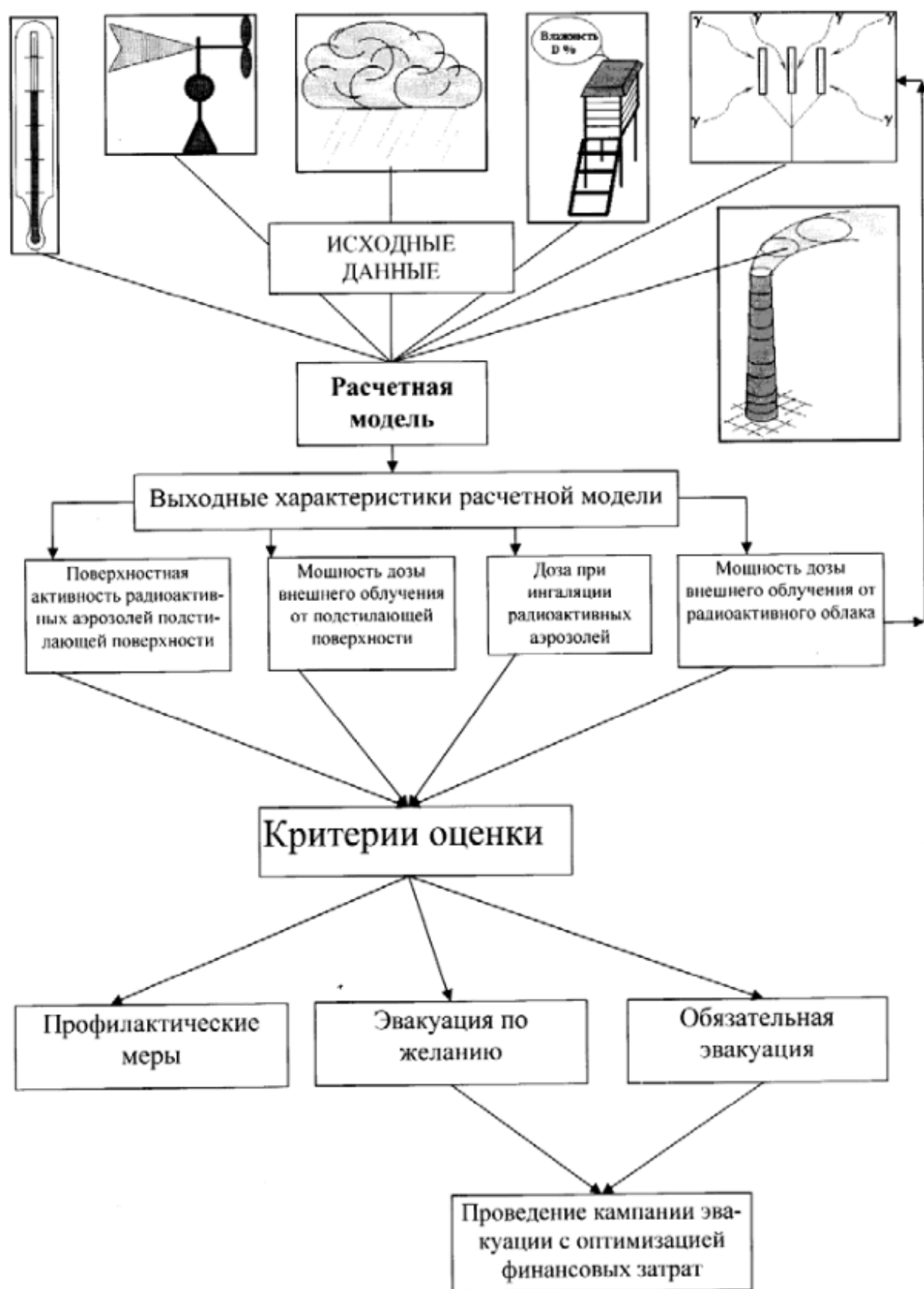


Рисунок 1.2 — Структурная схема АСКРО [16].

1.5 Заключение обзора АСКРО

В данной главе было приведено краткое введение в автоматизированные системы контроля радиационной обстановки. В начале было показано, почему разработка АСКРО является важной и актуальной задачей для атомной энергетики при строительстве атомных электростанций. Далее были описаны основные цели и задачи, которые решаются посредством автоматизированных систем контроля радиационной обстановки. Было представлено совершенствование АСКРО на различных этапах развития атомной энергетики, а также состав АСКРО и принцип её работы.

Модель активации теплоносителя первого контура

2.1 Миграция радионуклидов на АЭС

Как и любое масштабное производство, АЭС выбрасывает в атмосферу и окружающую среду вредные вещества, среди которых есть и радиоактивные. При нормальных условиях эксплуатации эти выбросы незначительны, так как современные атомные электростанции содержат множество систем очистки сбросов от радионуклидов, однако при нарушении работы какой-либо из систем АЭС становится серьезным источником выбросов радионуклидов в атмосферу.

Хотя принцип работы различных типов ядерных реакторов одинаков, их технологические схемы и устройства различны. В данном разделе рассмотрим образование радионуклидов с дальнейшим переходом в теплоноситель первого контура на примере реактора типа ВВЭР.

Основные пути распространения радиоактивных нуклидов на АЭС представлены на рисунке 2.1.

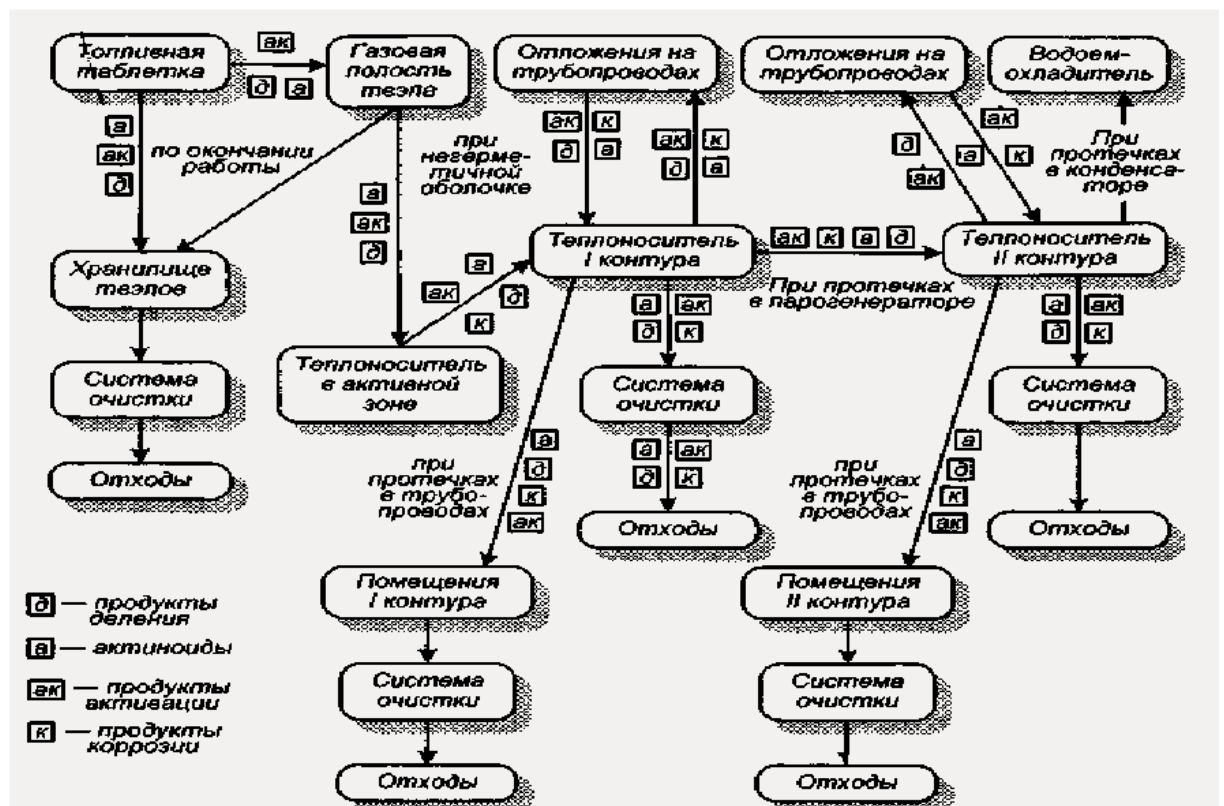


Рисунок 2.1 — Основные пути распространения радионуклидов на АЭС.

Топливную таблетку в ТВЭЛах рассматривают как первый барьер распро-

странения радиоактивных нуклидов в пределах активной зоны ядерного реактора. В результате реакции деления и захвата нейтронов в топливной таблетке накапливаются радионуклиды, изменяя состав, физико-химические и механические свойства топливной композиции. При температуре ниже 1000 °С диоксид урана, который наиболее часто используется в качестве топлива в реакторах типа ВВЭР, удерживает все радионуклиды, образующиеся в процессе работы реактора. При росте температуры ситуация существенно меняется, так как продукты захвата и деления становятся более подвижными [23].

Между топливной таблеткой и оболочкой ТВЭЛа присутствует небольшой зазор и газовая полость, предназначенные для накопления продуктов деления и активации, которым удалось покинуть пределы топливной таблетки.

Вторым барьером распространения радионуклидов является оболочка ТВЭЛов. В случае герметичной оболочки ТВЭЛов выход радионуклидов за пределы оболочки достаточно мал. В реальности, из-за высоких тепловых и радиационных нагрузок и процессов коррозионно-усталостного типа оболочки теряют свою герметичность. Согласно [24], при эксплуатации ядерного реактора пределом безопасной эксплуатации по количеству и величине дефектов составляет 1 % ТВЭЛов с дефектами типа газовой неплотности.

В случае разгерметизации топливной оболочки радионуклиды диффундируют через микротрещины в теплоноситель, находящийся в активной зоне реактора, который в дальнейшем переходит в первый контур реакторной установки. Более того, дополнительным источником радиоактивности в теплоносителе первого контура является его активация нейтронами.

При эксплуатации АЭС в нормальном режиме работы обеспечивается локализация радиоактивных продуктов деления, продуктов активации в реакторной установке и основных системах очистки от радиоактивных нуклидов. Парогенератор и трубопроводы первого и второго контуров не позволяют значительной части радионуклидов покинуть основные барьеры. Однако при наличии микротрещин или протечек в парогенераторе радиоактивность первого контура может перейти в теплоноситель второго контура реакторной установки. В то же время, при протечках в трубопроводах первого или второго контура радионуклиды попадают в технические помещения, а далее загрязненный воздух через вентиляционные системы выбрасывается в атмосферу. Газообразные выбросы с АЭС перед попаданием в атмосферу проходят сложную систему очистки, ко-

торая в свою очередь необходима для снижения активности выбросов, а далее попадают в окружающую среду через высокую трубу.

Помимо газообразных радиоактивных отходов при работе реактора выделяются жидкие и твердые отходы (рисунок 2.2). Твердыми радиоактивными отходами являются конструкционные материалы из активной зоны и первого контура, фильтры очистки установок, загрязненные инструменты, приборы и т.д. Твердые радиоактивные отходы после эксплуатации отправляются на захоронение. Жидкие радиоактивные отходы также образуются в результате эксплуатации АЭС, в дальнейшем их очищают, разбавляют, фильтруют или концентрируют и хранят в специальных емкостях в жидком виде, однако при протечках в парогенераторе и конденсаторе радиоактивные отходы, мигрировавшие во второй контур реакторной установки, могут попасть в водоем-охладитель [25].

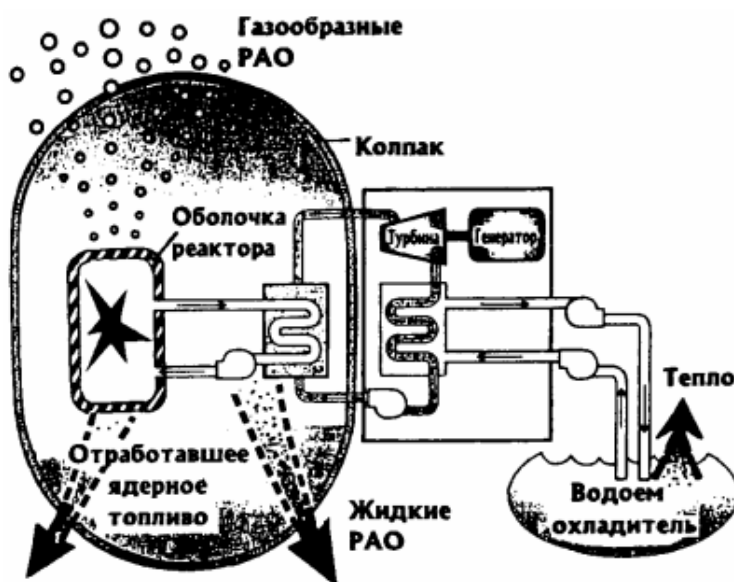


Рисунок 2.2 — Схема образования газообразных, жидких и твердых отходов от АЭС [25].

2.2 Образование газообразных радионуклидов АЭС

Рассмотрим наиболее важные радионуклиды, которые образуются в процессе работы реакторной установки и потенциально могут попасть в атмосферу путем газообразных выбросов АЭС. В качестве топлива рассматривается изотоп ^{235}U .

2.2.1 Инертные радиоактивные газы

Важную роль в формировании радиационной обстановки в районе выбросов АЭС являются инертные радиоактивные газы (ИРГ). ИРГ попадают в теплоноситель при разгерметизации оболочек ТВЭЛов путем диффузии. Более десятка нуклидов инертных радиоактивных газов (криптона и ксенона) образуется в процессе деления нейтронами ядерного топлива [25], а так же при распаде других продуктов реакции деления. Часть радионуклидов имеют либо малый период полураспада (меньше минуты), либо вносят ничтожно малый вклад в суммарную активность, из-за чего их можно не учитывать в расчетах. В реакторах типа ВВЭР инертные радиоактивные газы могут поступать в атмосферу путем утечки воды из первого контура реакторной установки или при утечке воды из второго контура реакторной установки при протечках в парогенераторе.

Среди радиоактивных изотопов ксенона, образующихся в процессе работы реактора, выделяют ^{133}Xe , ^{135}Xe , ^{137}Xe , ^{138}Xe [2]. Образование всех перечисленных изотопов в работающем реакторе происходит в результате деления ядерного топлива. Существует 2 основных канала образования изотопов ксенона. Ксенон образуется в результате распада изотопов йода (^{133}I , ^{135}I , ^{137}I , ^{138}I), которые, в свою очередь, также образуются в результате распада изотопов теллура (^{133}Te , ^{135}Te , ^{137}Te , ^{138}Te), являющихся продуктами реакции деления топлива. Также есть вероятность образования изотопов ксенона непосредственно в результате реакции деления ядерного топлива.

Цепочки распадов и образования изотопов ксенона, а так же информация о периодах полураспада и относительных выходах продуктов реакции деления, представлены на рисунках 2.3 — 2.6.

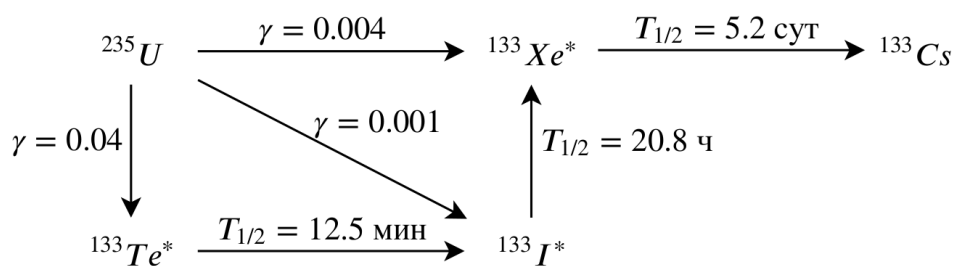


Рисунок 2.3 — Цепочка образования изотопа ^{133}Xe [26].

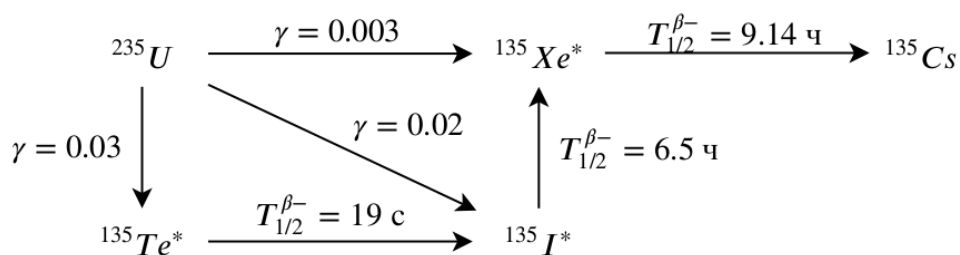


Рисунок 2.4 — Цепочка образования изотопа ${}^{135}\text{Xe}$ [26].

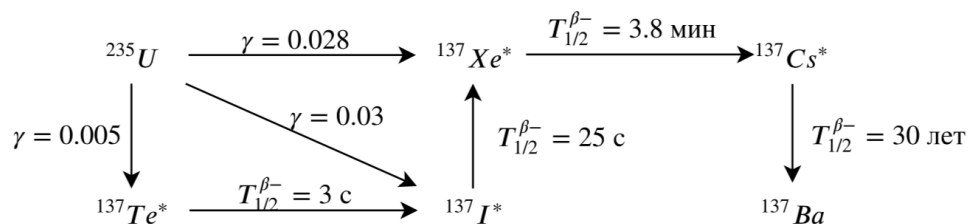


Рисунок 2.5 — Цепочка образования изотопа ${}^{137}\text{Xe}$ [26].

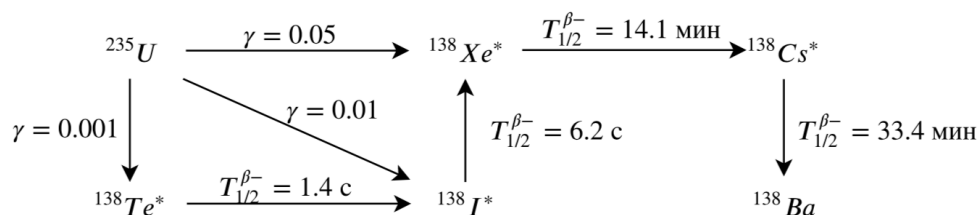


Рисунок 2.6 — Цепочка образования изотопа ${}^{138}\text{Xe}$ [26].

Важными изотопами криптона, образующимися во время работы реактора, являются изотопы ${}^{85}\text{Kr}$, ${}^{87}\text{Kr}$, ${}^{88}\text{Kr}$ [2]. Их образование также происходит в результате реакции деления ядерного топлива по двум основным каналам: во-первых при распаде изотопов ${}^{85}\text{Br}$, ${}^{87}\text{Br}$, ${}^{88}\text{Br}$, которые, в свою очередь, образуются в результате распада изотопов ${}^{85}\text{Se}$, ${}^{87}\text{Se}$, ${}^{88}\text{Se}$, являющихся продуктами реакции деления топлива.

Цепочки распадов и образования изотопов криптона, а так же информация о периодах полураспада и относительных выходах продуктов реакции деления, представлены на рисунках 2.7 — 2.8.

Стоит отметить, что радионуклиды, период полураспада которых намного меньше кампании реактора (${}^{137}\text{Xe}$, ${}^{87}\text{Kr}$), в ходе работы реактора быстро достигают состояния насыщения и их количество не меняется со временем. В то же время долгоживущие радионуклиды, период полураспада которых близок или превышает кампанию реактора (${}^{85}\text{Kr}$), накапливаются в топливе практически

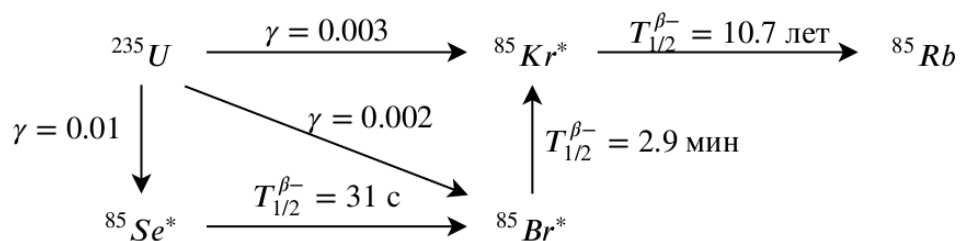


Рисунок 2.7 — Цепочка образования изотопа ^{85}Kr [26].

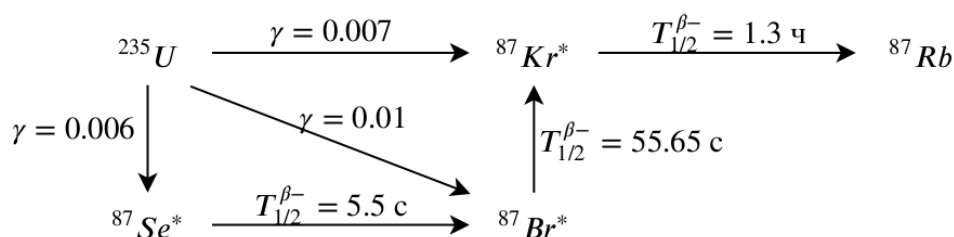


Рисунок 2.8 — Цепочка образования изотопа ^{87}Kr [26].

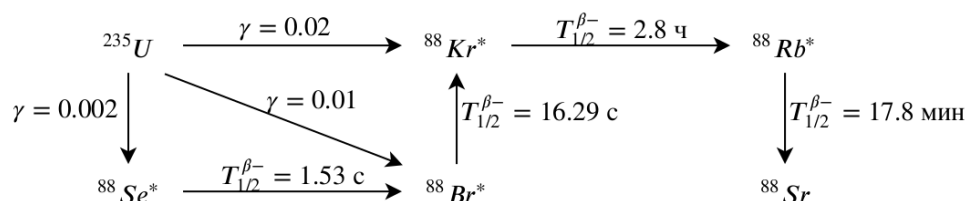


Рисунок 2.9 — Цепочка образования изотопа ^{88}Kr [26].

линейно со временем [27].

2.2.2 Изотопы йода

Не менее важными газообразными радионуклидами, попадающими в атмосферу, являются изотопы йода. Наиболее важными изотопами йода, образующимися во время работы реактора, являются изотопы ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I [2]. Все перечисленные изотопы образуются либо в качестве продуктов деления ядерного топлива, либо как продукты распада изотопов ^{131}Te , ^{132}Te , ^{133}Te , ^{134}Te , ^{135}Te . Пути попадания радиоактивных изотопов йода в атмосферу аналогичны инертным радиоактивным газам. Цепочки образования изотопов ^{133}I и ^{135}I представлены на рисунках 2.3 и 2.4, а изотопов ^{131}I , ^{132}I , ^{134}I на рисунках 2.10 - 2.12 соответственно.

Из-за небольшого периода полураспада, в реакторе для вышеперечислен-

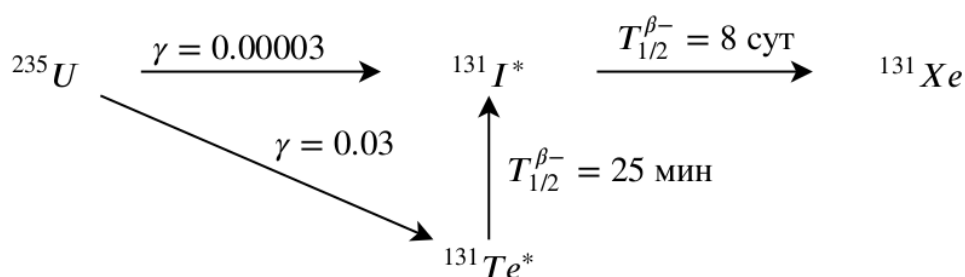


Рисунок 2.10 — Цепочка образования изотопа ^{131}I [26].

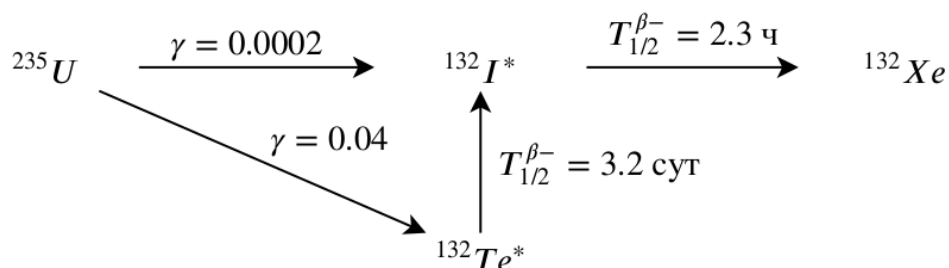


Рисунок 2.11 — Цепочка образования изотопа ^{132}I [26].

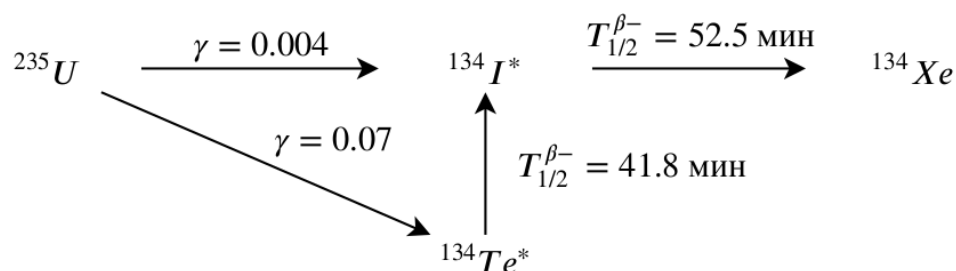


Рисунок 2.12 — Цепочка образования изотопа ^{134}I [26].

ных радионуклидов достаточно быстро устанавливается равновесное состояние. Исключение составляет изотоп ^{129}I ($T_{1/2} = 1.57 \times 10^7$ лет), однако согласно [25] долгоживущий йод не обнаруживают в атмосфере и окружающей среде вокруг АЭС и его выбросы во много раз меньше выбросов других радионуклидов йода.

2.2.3 Аэрозоли

Некоторые продукты деления ядер топлива, продукты распада ИРГ и радионуклиды с наведенной активностью образуют аэрозоли, которые попадают во внешнюю среду с воздушными потоками. Наиболее важными радионуклидами, входящими в состав аэрозольных выбросов с реактора типа ВВЭР, являются

^{88}Rb , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{138}Cs , ^{60}Co .

Изотоп ^{88}Rb образуется в реакторе в результате распада изотопа ^{88}Kr , а также в результате реакции деления ядерного топлива с относительным выходом $\gamma = 0.0004$ [2]. Цепочка образования ^{88}Rb представлена на рисунке 2.9.

Изотоп ^{134}Cs образуется в реакторе в результате реакции деления ядерного топлива, а также в результате захвата нейтрона стабильным изотопом ^{133}Cs , который образуется в реакторе в результате распада изотопа ^{133}Xe как показано на рисунке 2.3. Цепочки образования изотопа ^{134}Cs , а также информация о периодах полураспада и относительных выходах продуктов реакции деления, представлены на рисунке 2.13 [2].

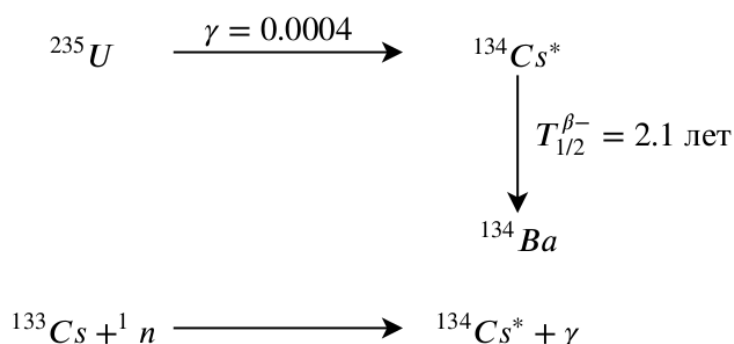


Рисунок 2.13 — Цепочки образования изотопа ^{134}Cs [26].

Изотопы ^{137}Cs и ^{138}Cs образуются в реакторе в результате реакции деления ядерного топлива с относительными долями выхода $\gamma = 0.0008$ и $\gamma = 0.001$ соответственно. Также рассматриваемые изотопы цезия образуются в результате распада изотопов ^{137}Xe и ^{138}Xe , как было показано на рисунках 2.5 - 2.6 [2].

Изотоп ^{60}Co образуется в реакторе в результате активации продукта коррозии конструкционных материалов ^{59}Co . Накопление изотопа ^{59}Co в реакторе происходит в результате длительной и многократной циркуляции теплоносителя в первом контуре реакторной установки. Цепочка образования изотопа ^{60}Co представлена на рисунке 2.14 [2].

2.2.4 Активационные газы

В процессе работы реактора при облучении стабильных изотопов нейтронами образуются активационные газы. Важнейшими активационными газами являются изотопы ^{16}N и ^{41}Ar [2].

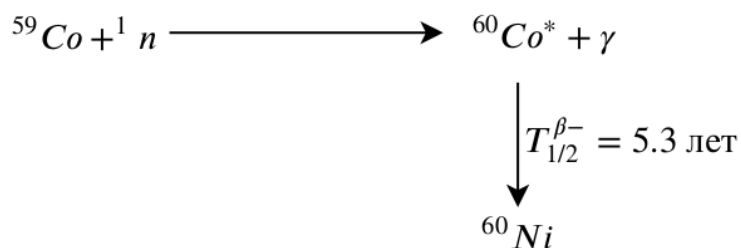


Рисунок 2.14 — Цепочка образования изотопа ${}^{60}\text{Co}$ [26].

Изотоп ${}^{16}\text{N}$ образуется в реакторе при облучении нейтронами стабильного изотопа ${}^{16}\text{O}$, который содержится в реакторе типа ВВЭР в оксидном топливе, а также в теплоносителе [2]. Цепочка образования изотопа ${}^{16}\text{N}$ представлена на рисунке 2.15.

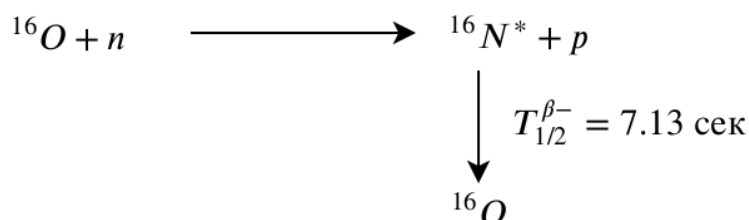


Рисунок 2.15 — Цепочка образования изотопа ${}^{16}\text{N}$ [26].

Изотоп ${}^{41}\text{Ar}$ образуется при облучения нейтронами изотопа ${}^{40}\text{Ar}$, растворенного в теплоносителе вместе с воздухом [2]. Цепочка образования изотопа ${}^{41}\text{Ar}$ представлена на рисунке 2.16.

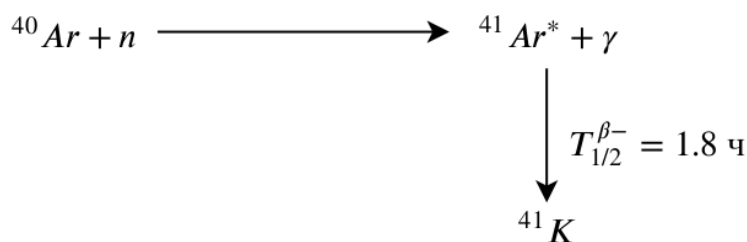


Рисунок 2.16 — Цепочка образования изотопа ${}^{41}\text{Ar}$ [26].

2.2.5 Углерод

Радиоактивный углерод ${}^{14}\text{C}$ образуется в реакторе по трём основным каналам: активация нейтронами естественных карбидных солей в теплоносителе первого контура, содержащих ${}^{13}\text{C}$; активация азота ${}^{14}\text{N}$; активация кислорода,

содержащегося в оксидном топливе и в теплоносителе первого контура [25]. Цепочки образования изотопа ^{14}C представлены на рисунке 2.17.

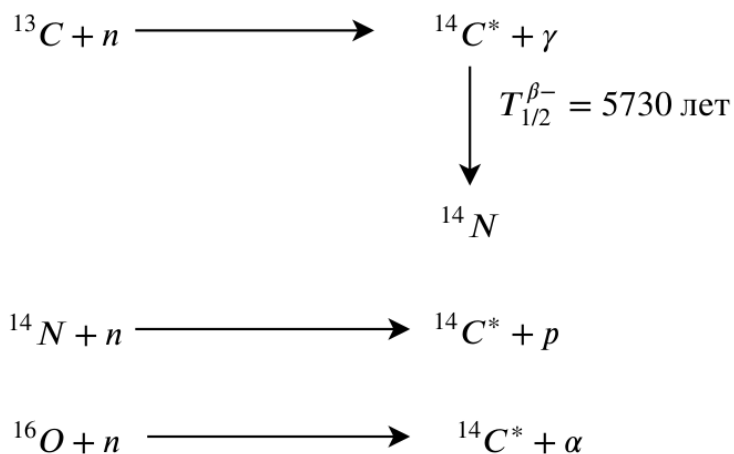


Рисунок 2.17 — Цепочки образования изотопа ^{14}C [26].

2.2.6 Тритий

Газообразный тритий ^3H образуется в реакторе по двум основным каналам: при тройном делении ядер топлива и в ходе активации дейтерия, содержащегося в теплоносителе в качестве примеси [25]. Цепочки образования изотопа ^3H представлены на рисунке 2.18.

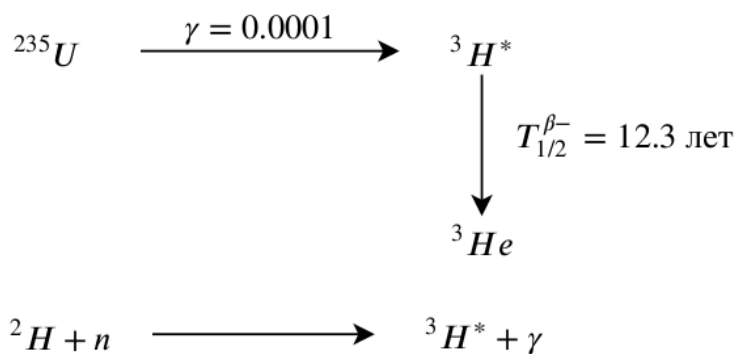


Рисунок 2.18 — Цепочки образования изотопа ^3H [26].

2.3 Активация теплоносителя радионуклидами, выходящими из под оболочки ТВЭЛов

Как было сказано в разделе 2.2, в случае разгерметизации оболочек ТВЭЛов в теплоноситель первого контура могут попасть следующие радионуклиды, образующиеся в результате реакции деления ядер топлива: изотопы йода (^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I), изотопы, входящие в состав аэрозолей (^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{138}Cs , ^{88}Rb), инертные радиоактивные газы (^{133}Xe , ^{135}Xe , ^{137}Xe , ^{138}Xe , ^{85}Kr , ^{87}Kr , ^{88}Kr), а так же тритий (^3H).

Изменение концентрации i -ого нуклида, который образуется под оболочкой твэла в результате деления, определяется формулой 2.1.

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -\lambda_i c_i + \gamma_i \Sigma_f \phi - S_i \quad (2.1)$$

где:

- c_i — концентрация i -го нуклида под оболочкой ТВЭЛа;
- λ_i — постоянная распада i -ого нуклида;
- γ_i — вероятность выхода i -ого нуклида при реакции деления;
- Σ_f — макроскопическое сечение деления ядер топлива;
- ϕ — поток нейтронов;
- S_i — скорость выхода i -ого нуклида из-под оболочки ТВЭЛа.

В левой части уравнения 2.1 - скорость изменения концентрации i -ого нуклида под оболочкой ТВЭЛа, которая представлена в виде суммы трех слагаемых: скорости распада нуклида, скорости образования нуклида в результате деления ядер топлива и скорости увода нуклида через микротрещина разгерметизированных оболочек ТВЭЛов в теплоноситель первого контура.

Уравнение 2.2 описывает баланс между концентрацией i -ого нуклида в теплоносителе первого контура без учета его очистки и выходом i -ого нуклида из-под оболочки ТВЭЛов:

$$S_i^0 = \lambda_i \tilde{c}_i^0 \frac{V_{coolant}}{V_{core}} \quad (2.2)$$

где:

- \tilde{c}_i^0 — равновесная концентрация i -ого нуклида в теплоносителе первого контура;

S_i^0 — равновесный выход i -ого нуклида из-под оболочки ТВЭЛов, при котором в теплоносителе первого контура будет установлена концентрация \tilde{c}_i^0 i -ого нуклида;

$V_{coolant}$ — объем теплоносителя первого контура;

V_{core} — объем активной зоны.

Выход радионуклидов через оболочку зависит от множества параметров. Для упрощения ограничимся зависимостью выхода от концентрации примеси в ТВЭЛах, давления в теплоносителе первого контура и числа поврежденных ТВЭЛов. Зависимость выхода i -ого радионуклида из-под оболочки ТВЭЛов представлена в формуле 2.3:

$$S_i = S_i^0 F_i(c_i, P, N_{failedRods}) \quad (2.3)$$

где:

P — давление в теплоносителе первого контура;

$N_{failedRods}$ — количество поврежденных ТВЭЛов;

F_i — функция, учитывающая отклонение значение выхода i -ого нуклида из-под оболочки ТВЭЛа от равновесного при изменении любого из её параметров.

Отметим, что функция $F_i(c_i, P, N_{failedRods})$ в модели определяется таким образом, что S_i соответствует равновесному выходу i -ого радионуклида при номинальном режиме работы реакторной установки. Иначе говоря, при отсутствии поврежденных ТВЭЛов, а так же при давлении в первом контуре, соответствующем номинальному давлению и достижении равновесного значения концентрации i -ого радионуклида под оболочкой ТВЭЛа функция $F_i(c_i, P, N_{failedRods})$ равна 1.

Изменение концентрации радионуклидов в теплоносителе первого контура определяется формулой 2.4:

$$\frac{\partial \tilde{c}_i}{\partial t} = -\lambda_i \tilde{c}_i + S_i \quad (2.4)$$

Учитывая выражения 2.2 и 2.3 преобразуем уравнение 2.4 к виду 2.5:

$$\frac{\partial \tilde{c}_i}{\partial t} = -\lambda_i \tilde{c}_i + \lambda_i \tilde{c}_i^0 F_i \quad (2.5)$$

Представим функцию F_i в виде произведения четырёх сомножителей (фор-

мула 2.6):

$$F_i = Z_i K_i Q_i M_i \quad (2.6)$$

где:

Z_i — функция, определяющая зависимость выхода радионуклидов из-под оболочки ТВЭЛов от количества поврежденных ТВЭЛов;

K_i — функция, определяющая зависимость выхода радионуклидов из-под оболочки ТВЭЛов от давления в активной зоне ядерного реактора;

Q_i — функция, определяющая зависимость выхода радионуклидов из-под оболочки ТВЭЛов от концентрации i -ого радионуклида под оболочкой ТВЭЛов;

M_j — функция, учитывающая изменение плотности теплоносителя в j -ом расчетном ноде от средней плотности при номинальной мощности реактора.

Функция Z_i определяется как линейная функция от числа поврежденных ТВЭЛов (формула 2.7):

$$Z_i = 1 + z_i N_{failedRods} \quad (2.7)$$

где:

z_i — коэффициент, определяющий увеличение концентрации i -ого радионуклида при повреждении одного ТВЭЛа.

Функция K_i определяется как дробно-линейная функция 2.8:

$$K_i = \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\alpha_i} \quad (2.8)$$

где:

P — текущее давление в первом контуре реакторной установки;

P_0 — давление в первом контуре реакторной установки в номинальном режиме работы;

α_i — степенной показатель, принятый в модели равным 1,5.

Функция Q_i определяется как дробно-линейная функция 2.9:

$$Q_i = \frac{c_i}{c_i^0} \quad (2.9)$$

Функция M_j зависит от плотности теплоносителя в j -ом расчетном ноде и определяется как отношение суммарной массы теплоносителя в активной зоне к массе теплоносителя в расчетном ноде (формула 2.10). В текущей модели активная зона реактора разбивается на 27 эквивалентных каналов в разрезе и 20 высотных слоев, то есть индекс j проходит от 1 до $27 \times 20 = 540$.

$$M_j = \frac{\sum_{j=1}^{540} V_j \bar{\rho}}{V_j \rho_j} \quad (2.10)$$

где:

V_j — объем j -ого расчетного нода;

$\bar{\rho}$ — средняя плотность теплоносителя в активной зоне при номинальной мощности реактора;

ρ_j — плотность теплоносителя в j -ом расчетном ноде.

В итоге, подставляя формулы 2.7 – 2.10 в выражение 2.6, а получившееся выражение в 2.5, получим уравнение 2.11:

$$\frac{\partial \tilde{c}_i}{\partial t} = -\lambda_i \tilde{c}_i + \lambda_i \tilde{c}_i^0 (1 + z_i N_{failedRods}) \frac{c_i}{c_i^0} \frac{\sum_{j=1}^{540} V_j \bar{\rho}}{V_j \rho_j} \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\alpha_i} \quad (2.11)$$

Определим равновесную концентрацию i -ого радионуклида под оболочкой ТВЭЛов. В случае герметичной оболочки ТВЭЛа выход радионуклидов из-под оболочки пренебрежимо мал, из-за этого слагаемым в правой части уравнения 2.1, отвечающим за увод радионуклидов из-под оболочки, можно пренебречь. Тогда выражение 2.1 принимает вид 2.12:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -\lambda_i c_i + \gamma_i \Sigma_f \phi \quad (2.12)$$

В результате временной дискретизации уравнения 2.12 получим формулу 2.13:

$$c_i(t) = \frac{c_i(t - \Delta t) + \gamma_i \Sigma_f \phi \Delta t}{1 + \lambda_i \Delta t} \quad (2.13)$$

В текущей модели используется внесистемная единица измерения плотности потока нейтронов Вт/см², из-за чего плотность потока нейтронов необходимо дополнительно умножить на коэффициент k , который представлен в формуле 2.14:

$$k = \frac{\nu_f}{E_f} \quad (2.14)$$

где:

ν_f — выход нейтронов на одно деление ядер топлива;

E_f — энергия, выделяемая в результате одного деления ядер топлива (Дж).

Учитывая этот коэффициент, выражение 2.13 принимает вид 2.15:

$$c_i(t) = \frac{c_i(t - \Delta t) + \gamma_i \Sigma_f k \phi \Delta t}{1 + \lambda_i \Delta t} \quad (2.15)$$

Приравняв в выражении 2.12 частную производную концентрации радионуклидов по времени к нулю получим равновесную концентрацию i -ого нуклида под оболочкой ТВЭЛа (формула 2.16):

$$c_i^0 = \frac{\gamma_i \Sigma_f k \phi}{\lambda_i} \quad (2.16)$$

Активность радионуклида определяется как количество распадов нуклида в единицу времени [3]. Активность i -ого радионуклида в теплоносителе связана с концентрацией радионуклида через постоянную распада (формула 2.17):

$$\widetilde{A}_i = \lambda_i \widetilde{c}_i \quad (2.17)$$

Учитывая формулу 2.17 преобразуем выражение 2.11. Результат представлен в конечной формуле 2.18:

$$\frac{\partial \widetilde{c}_i}{\partial t} = -\widetilde{A}_i + \widetilde{A}_i^0 (1 + z_i N_{failedRods}) \frac{c_i}{c_i^0} \frac{\sum_{j=1}^{540} V_j \bar{\rho}}{V_j \rho_j} \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\alpha_i} \quad (2.18)$$

где:

\widetilde{A}_i — активность i -ой примеси в теплоносителе 1-ого контура;

\widetilde{A}_i^0 — равновесная активность i -ой примеси в теплоносителе первого контура.

Значения равновесных активностей и другие характеристики радионуклидов, образующихся в топливе, использующиеся в текущей модели, приведены в приложении Б.

2.4 Образование радионуклидов в теплоносителе под действием облучения

2.4.1 Расчетная модель

Помимо выхода радионуклидов из-под оболочки ТВЭЛов, описанного в разделе 2.3, активация теплоносителя первого контура в реакторной установке происходит из-за облучения естественных примесей теплоносителя и продуктов коррозии конструкционных материалов.

В текущей модели активации естественных примесей теплоносителя и продуктов коррозии учитывается образование следующих радионуклидов: ^{16}N , ^{41}Ar , ^3H , ^{14}C .

При расчете концентрации естественных примесей в теплоносителе в модели применяется допущение, что эта концентрация остается постоянной со временем. Такое допущение обуславливается тем, что естественные примеси являются стабильными, а под действием облучения лишь небольшая часть примесей претерпевает ядерные превращения. Расчет концентраций естественных примесей в теплоносителе первого контура производится по формуле 2.19:

$$\tilde{c}_i^n = p_i^n \frac{N_a}{M_{H_2O}} \quad (2.19)$$

где:

\tilde{c}_i^n — массовая концентрация i -ого нуклида естественной примеси (ядер/кг теплоносителя);

p_i^n — доля i -ого нуклида естественной примеси в теплоносителе первого контура;

N_a — число Авогадро;

M_{H_2O} — молярная масса воды (кг/моль).

Скорость изменения i -ого радионуклида в теплоносителе рассчитывается по формуле 2.20:

$$\frac{\partial \tilde{c}_i}{\partial t} = -\lambda_i \tilde{c}_i + \sigma_i^{n,j} \tilde{c}_i^n \phi \quad (2.20)$$

где:

\tilde{c}_i — концентрация i -ого радионуклида, образующегося в результате об-

лучения естественных примесей, входящих в состав теплоносителя первого контура;

$\sigma_i^{n,j}$ — микроскопическое сечение реакции типа j на ядре i -ого нуклида, входящего в состав естественной примеси.

Для большей точности вычислений энергетическая область разбивается на 2 группы: быстрая и тепловая. Для расчета потоков нейтронов для быстрой и тепловой групп используется асимптотическая жесткость спектра нейтронов (формула 2.21):

$$\phi^{(1)} = \phi \frac{1}{1 + \zeta}, \phi^{(2)} = \phi \frac{\zeta}{1 + \zeta} \quad (2.21)$$

где:

$\phi^{(1)}$ — поток нейтронов быстрой группы;

$\phi^{(2)}$ — поток нейтронов тепловой группы;

ζ — асимптотическая жесткость спектра.

Учитывая формулы 2.14, 2.17, 2.21, перепишем уравнение 2.20 в виде 2.22:

$$\frac{\partial \tilde{c}_i}{\partial t} = -\tilde{A}_i + \sigma_i^{(1),n,j} \tilde{c}_i^n k \phi \frac{1}{1 + \zeta} + \sigma_i^{(2),n,j} \tilde{c}_i^n k \phi \frac{\zeta}{1 + \zeta} \quad (2.22)$$

где:

\tilde{A}_i — активность i -ого радионуклида в теплоносителе первого контура;

$\sigma_i^{(1),n,j}$ — микроскопическое сечение для нейтронов быстрой энергетической группы реакции типа j на ядре i -ого изотопа, входящего в состав естественных примесей;

$\sigma_i^{(2),n,j}$ — микроскопическое сечение для нейтронов тепловой энергетической группы реакции типа j на ядре i -ого изотопа, входящего в состав естественных примесей;

2.4.2 Расчет концентрации радионуклида N-16

Нуклид ^{16}N образуется в результате реакции (n, p) на ядре ^{16}O . Эта реакция является пороговой и идет только на быстрых нейтронах с порогом около 10,2 МэВ. Изотоп ^{16}O является стабильным и входит в состав молекулы воды, следовательно доля данного изотопа в теплоносителе первого контура равна единице. Зависимость сечения реакции (n, p) на ядре ^{16}O от энергии представ-

лена в приложении В. Двухгрупповые сечения реакции (n, p) на ядре ^{16}O были получены при помощи программы UNK [29].

Учитывая формулу 2.22 и пороговый характер реакции (n, p), скорость изменения концентрации ^{16}N представлена формулой 2.23:

$$\frac{\partial \tilde{c}_{N16}}{\partial t} = -\tilde{A}_{N16} + \sigma_{O16}^{(1),(n,p)} \tilde{c}_{O16} k \phi \frac{1}{1 + \zeta} \quad (2.23)$$

где:

$\sigma_{O16}^{(1),(n,p)}$ — сечение реакции (n, p) на ядре ^{16}O для быстрой группы нейтронов ($1,029 \times 10^{-29}$ барн [29]).

2.4.3 Расчет концентрации радионуклида Ar-41

В качестве естественной примеси в теплоносителе содержится нуклид ^{40}Ar , доля которого на кубометре пресной воды составляет $7 \times 10^{-6}\%$. При (n, γ) реакции на ядре изотопа ^{40}Ar образуется радионуклид ^{41}Ar . Зависимость сечения реакции (n, p) на ядре ^{40}Ar от энергии представлена в приложении В. Двухгрупповые сечения реакции (n, γ) на ядре ^{40}Ar были получены при помощи программы UNK: $\sigma_{Ar40}^{(1),(n,\gamma)} = 5,22 \times 10^{-27}$ барн, $\sigma_{Ar40}^{(2),(n,\gamma)} = 2,93 \times 10^{-25}$ барн.

Расчет концентрации ^{41}Ar в теплоносителе первого контура производится по формуле 2.22.

2.4.4 Расчет концентрации радионуклида H-3

Как было рассмотрено в разделе 2.2, газообразный тритий в реакторе образуется по двум основным каналам: при тройном делении ядер топлива и в результате активации дейтерия в ходе реакции (n, γ).

Расчет концентрации ^3H в теплоносителе первого контура, образующегося в результате реакции (n, γ) на ядре ^2H производится по формуле 2.22. Доля дейтерия в теплоносителе первого контура составляет $2,3 \times 10^{-2}\%$ на кубический метр. Двухгрупповые сечения реакции (n, γ) на ядре ^2H были посчитаны при помощи программы UNK: $\sigma_{H2}^{(1),(n,\gamma)} = 2,467 \times 10^{-28}$ барн, $\sigma_{H2}^{(2),(n,\gamma)} = 3,549 \times 10^{-30}$ барн. Зависимость сечения реакции (n, γ) на ядре ^2H от энергии представлена в приложении В.

2.4.5 Расчет концентрации радионуклида С-14

Согласно разделу 2.2, радиоактивный углерод образуется в реакторе по трем основным каналам. Рассмотрим каждый из них.

Во-первых, изотоп ^{14}C образуется в результате реакции (n, γ) на стабильном изотопе ^{13}C , который содержится в виде естественных карбидных солей в теплоносителе первого контура. Концентрация карбидных солей на дистиллированную воду составляет $5 \times 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ [30]. Доля изотопа ^{13}C в смеси стабильных изотопов ^{13}C и ^{12}C составляет 0,0107 [31], следовательно концентрация изотопа ^{13}C в теплоносителе первого контура составляет $5 \times 10^{-5} \text{ кг/м}^3$, а доля данного изотопа составляет $p_{C13} = \frac{\rho_{C13}}{\rho_{H_2O}} = 5,01 \times 10^{-6}\%$. Двухгрупповые сечения реакции (n, γ) на ядре ^{13}C были посчитаны при помощи программы UNK: $\sigma_{C13}^{(1),(n,\gamma)} = 4,472 \times 10^{-28}$ барн, $\sigma_{C13}^{(2),(n,\gamma)} = 1,497 \times 10^{-27}$ барн. Зависимость сечения реакции (n, γ) на ядре ^{13}C от энергии представлена в приложении В.

Во-вторых, изотоп ^{14}C образуется в результате реакции (n, p) на ядре ^{14}N . Суммарная концентрация аммониевых солей и нитратов на дистиллированную воду составляет $2 \times 10^{-5} \text{ кг/м}^3$ [30], следовательно доля ^{14}N в теплоносителе первого контура составляет $p_{N14} = \frac{\rho_{N14}}{\rho_{H_2O}} = 2,004 \times 10^{-6}\%$. Двухгрупповые сечения реакции (n, p) на ядре ^{14}N были посчитаны при помощи программы UNK: $\sigma_{N14}^{(1),(n,p)} = 1,974 \times 10^{-26}$ барн, $\sigma_{N14}^{(2),(n,p)} = 2,337 \times 10^{-25}$ барн. Зависимость сечения реакции (n, p) на ядре ^{14}N от энергии представлена в приложении В.

В третьих, изотоп ^{14}C образуется в результате реакции (n, α) на ядре ^{17}O . Доля изотопа ^{17}O в смеси стабильных изотопов кислорода составляет 0,037% [32].

Для расчета микроскопического сечения реакции (n, α) на изотопе ^{17}O в тепловой области энергий используется закон $\frac{1}{v}$ по формуле 2.24:

$$\sigma_{O17}^{(2),(n,\alpha)} = \sigma_{O17}^{0,(n,\alpha)} \frac{V_{th}^0}{V_{th}} = \sigma_{O17}^{0,(n,\alpha)} \frac{1}{V_{th}} \sqrt{\frac{2E_{th}^0 k}{m_n}} \quad (2.24)$$

где:

V_{th} - текущая скорость тепловых нейтронов;

V_{th}^0 - скорость тепловых нейтронов в тепловой точке (2200 м/с [33]);

E_{th}^0 - энергия тепловых нейтронов в тепловой точке (0,0253 эВ [33]);

$\sigma_{O17}^{0,(n,\alpha)}$ - сечение реакции (n, α) при энергии тепловой точки ($4,986 \times 10^{-25}$

барн [28]);

m_n - масса нейтрона ($1,675 \times 10^{-27}$ кг [33]);

k - коэффициент для перевод эВ в Дж ($1,60218 \times 10^{-19}$).

Для расчета микроскопического сечения реакции (n, α) на изотопе ^{17}O в быстрой области энергий используется усреднение по спектру Ферми. Выбор спектра Ферми объясняется малым сечением поглощения нейтронов теплоносителем по сравнению с сечением рассеяния и малой концентрацией поглотителя ^{17}O в теплоносителе. Зависимость сечения реакции (n, α) на ядре ^{17}O от энергии была взята из библиотеки TENDL-2017 [28] и представлена в приложении В. Расчет производится по формуле 2.25:

$$\sigma_{O17}^{(1),(n,\alpha)} = \frac{\int_0^{E_{th}} \sigma_{O17}^{(n,\alpha)}(E) \phi^F(E) dE}{\int_0^{E_{th}} \phi^F(E) dE}, \phi^F(E) = \frac{1}{\zeta \rho_{H_2O} \sigma_{H_2O}^s E} \quad (2.25)$$

где:

E_{th} - граница тепловой области (~ 2 эВ);

$\phi^F(E)$ - спектр Ферми;

ζ - среднелогарифмическая потеря энергии нейтрона при столкновении с ядрами воды (0,948 [34]);

ρ_{H_2O} - плотность воды в реакторе (720 кг/м^3);

$\sigma_{H_2O}^s$ - сечение рассеяния воды (21×10^{-24} барн [28]).

Результаты расчета микроскопических сечений реакции (n, α) на изотопе ^{17}O представлены в приложении Г. Расчет концентрации ^{14}C в теплоносителе первого контура, образующегося в результате вышеперечисленных реакций, производится по формуле 2.22.

2.5 Заключение моделирования активации теплоносителя первого контура

В данной главе была представлена модель образования радионуклидов в теплоносителе первого контура. Было представлено 2 основных способа образования радионуклидов в теплоносителе: выход радионуклидов из-под оболочки ТВЭЛов и облучение естественных примесей теплоносителя первого контура с их дальнейшим превращением в радионуклиды.

При делении ядерного топлива образуются радиоактивные осколки, которые при разгерметизации оболочек ТВЭЛов могут перейти в теплоноситель первого контура. В текущей модели расчет концентрации радионуклидов, вышедших из-под оболочек ТВЭЛов в теплоноситель первого контура, производится по формуле 2.18. Основные характеристики радионуклидов, образующихся в топливе, представлены в приложении Б.

В теплоносителе первого контура присутствуют естественные примеси, которые при облучении нейтронами могут перейти в радиоактивные нуклиды. В текущей модели расчет концентрации радионуклидов, образующихся в результате активации нейтронами естественных примесей теплоносителя первого контура, производится по формуле 2.22. Параметры основных радионуклидов, образующихся в теплоносителе первого контура в результате активации нейтронами естественных примесей, представлены в приложении Г.

ГЛАВА 3

Разработка модуля анализа свойств местности, прилегающей к АЭС

3.1 Модель переноса радиоактивных примесей в атмосфере

Модель переноса радиоактивных примесей в атмосфере, которая используется при разработке проекта АСКРО, основывается на решении полуэмперического уравнения адвекции-диффузии [16] методом конечных элементов. Рассмотрим это уравнение, описывающее перенос радиоактивной примеси в атмосфере (формула 3.1):

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \operatorname{div}(\vec{U}q) + \lambda q = Dq + f \quad (3.1)$$

с начальными условиями 3.2:

$$q(x, y, z, t)|_{t=0} = 0 \quad (3.2)$$

и граничными условиями 3.3 — 3.5:

$$q(x, y, z, t)|_{x=0} = 0; \quad q(x, y, z, t)|_{y=0} = 0; \quad (3.3)$$

$$q(x, y, z, t)|_{x \rightarrow \infty} = 0; \quad q(x, y, z, t)|_{y \rightarrow \infty} = 0; \quad (3.4)$$

$$q(x, y, z, t)|_{z \rightarrow \infty} = 0; \quad k \frac{\partial q}{\partial z}|_{z=z_0} = (\beta - \omega)q|_{z=z_0} \quad (3.5)$$

где:

q — концентрация радиоактивной примеси;

$\vec{U} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$ — вектор скорости частиц воздуха; $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ — единичные векторы; u, v, w — продольная, поперечная и вертикальная составляющие вектора скорости;

$D = \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial q}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial q}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k \frac{\partial q}{\partial z})$ — оператор турбулентной диффузии;

λ — постоянная распада (c^{-1});

$\mu(x, y, z)$ — продольно-поперечный коэффициент турбулентной диффузии;

$k(x, y, z)$ — вертикальный коэффициент турбулентной диффузии;

f — источник радиоактивной примеси;

β — скорость сухого осаждения;

ω — гравитационная скорость осаждения радиоактивной примеси;
 z_0 — параметр шероховатости подстилающей поверхности.

3.2 Необходимость анализа свойств местности

Анализ свойств местности, прилегающей к АЭС, является важной задачей при разработке модели АСКРО.

Как было показано в разделе 3.1, уравнение адвекции-диффузии зависит от таких функций и параметров, как: скорость частиц воздуха, коэффициент диффузии, скорость сухого осаждения, скорость гравитационного осаждения и шероховатость подстилающей поверхности. Все перечисленные параметры явно или неявно зависят от типа местности (подробнее об этих параметрах описано в последующих разделах отчета), поэтому, перед построением расчетной сетки и аппроксимацией свойств местности на узлы расчетной сетки, необходимо разработать модуль, отвечающий за анализ свойств местности, прилегающей к АЭС, по данным топологических карт.

3.3 Принцип анализа свойств местности

Модуль анализа свойств местности основан на обработке изображения топологической карты. При разработке модуля использовалась карта местности, прилегающая к Калининской АЭС, расположенная вблизи города Удомля Тверской области (рисунок 3.1), однако в дальнейшем модуль можно использовать для любой АЭС. Масштаб карты был выбран таким образом, что радиус от центра карты до её верхнего края составляет порядка 30-ти километров.

Для анализа свойств местности изображение топологической карты разбивается на пиксели. Каждый пиксель изображения имеет свой цвет. При разработке модуля анализа свойств местности используется цветовая модель RGB. В результате разбивки топологической карты на пиксели получается двумерный массив, содержащий цвета пикселей в RGB-модели.

С другой стороны, у рассматриваемой топологической карты имеется легенда, то есть таблица условных обозначений на карте с разъяснением их значения. По легенде карты можно понять, какой тип местности соответствует опреде-

ленному цвету. Для примера, в таблице 3.1 приведена легенда карты, изображенной на рисунке 3.1, по которой можно определить интересующие нас типы местности.

В итоге, имеется двумерный массив цветов всех пикселей изображения топологической карты и легенда этой карты, которые можно программно сопоставить и определить, какому типу местности соответствуют каждый из пикселей. В дальнейшем, имея информацию о типе местности для каждого из пикселей, есть возможность спроецировать эту информацию на узлы расчетной сетки, разработка которой описана в последующих главах.

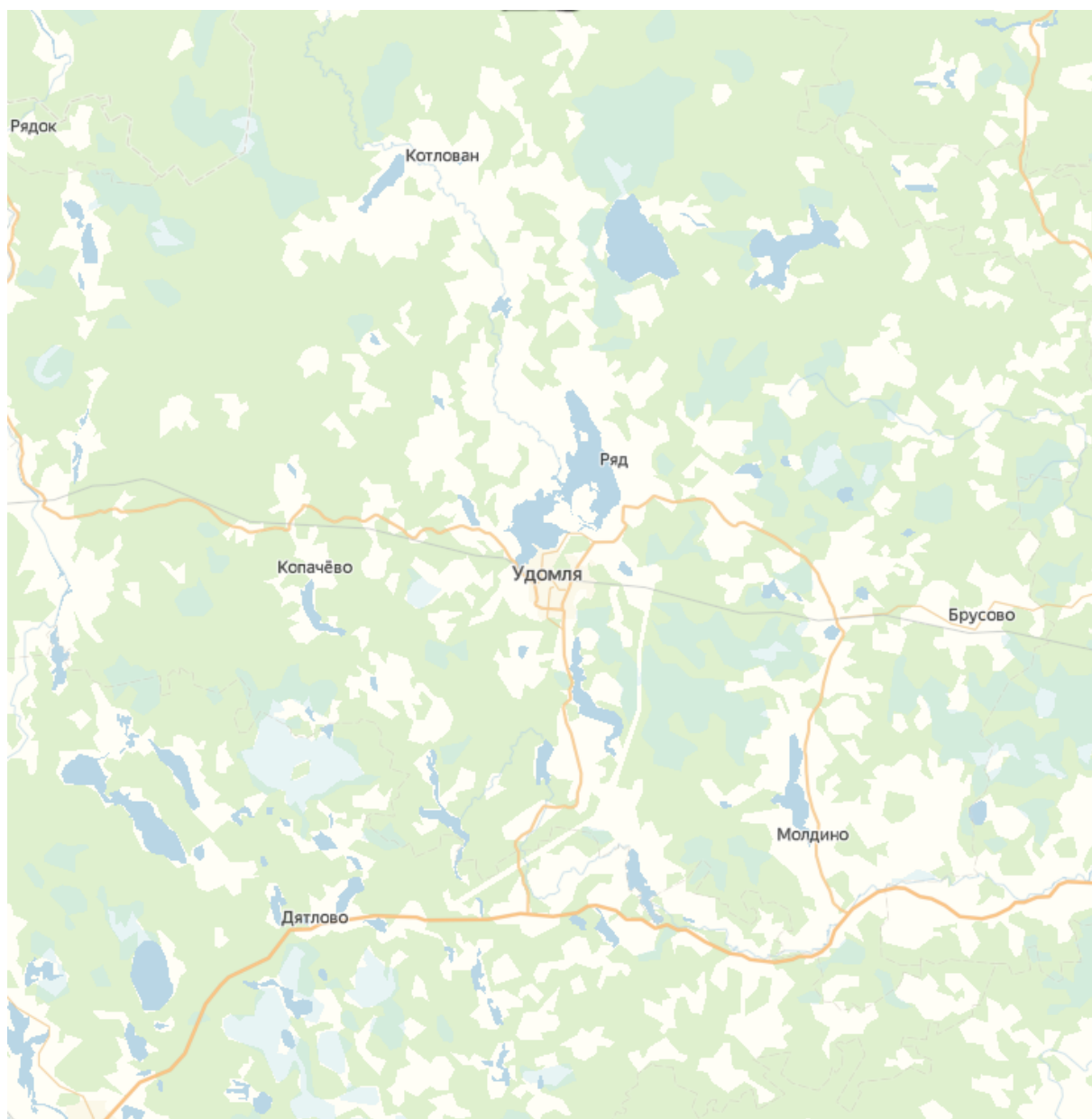


Рисунок 3.1 — Топологическая карта местности, прилегающей к Калининской АЭС.

Таблица 3.1 — Соответствие типов местности на карте, изображенной на рисунке 3.1, и цветов в RGB-модели.

Тип местности	Цвет в RGB-модели
Лесная местность	[212, 229, 206]
Водная поверхность	[170, 203, 217]
Городская местность	[245, 234, 197]
Сельскохозяйственные угодья	[255, 255, 238]

3.4 Разработка программного кода анализа свойств местности

При разработке программного кода, осуществляющего анализ свойств местности, используется язык программирования Python.

Официальный репозиторий PyPI языка Python содержит библиотеку Pillow [35], которая является улучшением библиотеки PIL (Python Imaging Library), предназначенной для работы с растровой графикой. Библиотека Pillow поддерживает множество форматов изображений (BMP, EPS, GIF, JPEG, PDF, PNG, PNM, TIFF и некоторых других на чтение и запись), позволяет преобразовывать изображения из одного формата в другой, считывать информацию об изображении, а так же править его. При разработке модуля анализа свойств местности используется библиотека Pillow.

Для начала, необходимо открыть файл изображения топологической карты при помощи функции *open()* класса *Image*, а затем преобразовать пиксели изображения в RGB-модель.

Функция *open()* является "ленивой" и при её вызове не происходит непосредственной загрузки изображения. Для загрузки информации о пикселях используется функция *load()*. При вызове этой функции происходит выделение оперативной памяти под набор пикселей и их загрузка в память. Для более удобной работы с пикселями дополнительно преобразовываем их набор в *numpy* массив.

Дополнительно, с помощью библиотеки Pillow, получаем такие вспомогательные параметры изображения топологической карты местности, как: ширина изображения в пикселях, высота изображения в пикселях, координаты центрального пикселя изображения и радиус изображения в пикселях.

В итоге, на выходе модуля анализа свойств местности была получена информация о каждом пикселе изображения топологической карты местности,

прилегающей к АЭС, а так же дополнительные параметры изображения топологической карты.

3.5 Заключение разработки модуля анализа свойств местности, прилегающей к АЭС

В данной главе была описана модель переноса радиоактивных примесей в атмосфере, которая используется при разработке проекта АСКРО. Модель содержит параметры и функции, зависящие от свойств местности. С целью получения информации о свойствах местности, прилегающей к АЭС, был разработан программный модуль, позволяющий получать эту информацию по данным топологических карт. В последующих главах полученная информация будет использоваться при аппроксимации свойств местности на узлы расчетной сетки для решения уравнения адвекции-диффузии методом конечных элементов.

Разработка расчетной сетки и аппроксимация свойств местности на узлы сетки

4.1 Расчетная сетка в методе конечных элементов

Для решения уравнения адвекции-диффузии, описанного в разделе 3.1, в модели АСКРО применяется метод конечных элементов. В этом методе область, в которой ищется решение уравнения, разбивается на конечное количество подобластей. Каждая из этих подобластей называется элементами. В каждом элементе выбирается вид аппроксимирующей функции. Вне своего элемента аппроксимирующая функция равняется нулю. Значения функций в узлах элементов заранее неизвестны и являются решением задачи. Вначале ищутся коэффициенты аппроксимирующих функций из условия равенства соседних функций в узлах элементов. После этого, коэффициенты выражаются через значения функций в узлах элементов. Составляется система линейных алгебраических уравнений, количество уравнений в которой равно количеству неизвестных значений в узлах, в которых ищется решение системы.

Расчетная сетка в модели АСКРО имеет форму цилиндра и представляет собой участок местности вблизи АЭС. Так как расчетная сетка имеет форму цилиндра, её элементы должны быть трехмерными.

Существует четыре основных типа трехмерных элементов: тетраэдры, гексаэдры, призмы и пирамиды (рисунок 4.1). Самым распространенным элементом при построении расчетных сеток являются тетраэдры.

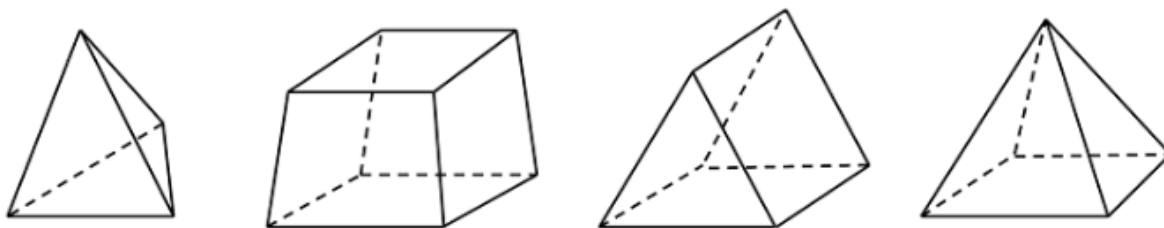


Рисунок 4.1 — Основные типы трехмерных элементов расчетной сетки.

Тетраэдрический элемент является простейшим элементом и позволяет построить расчетную сетку практически для любого трёхмерного тела. В модели АСКРО для решения уравнения адвекции-диффузии методом конечных элементов используется расчетная сетка с тетраэдрическими элементами.

4.2 Создание расчетной сетки

Построение расчетной сетки для решения уравнения методом конечных элементов является сложной задачей, особенно для объекта нетривиальной формы. Как правило, создание расчетных сеток представляет собой трудоемкий и кропотливый процесс. В современном мире существует ряд технологий, позволяющих упростить создание расчетной сетки: программа *gms*, предназначенная для построения трёхмерных расчетных сеток для решения задач методом конечных элементов [20], а так же библиотека *pygm* для языка программирования Python [21], предоставляющая удобный интерфейс для работы с программой *gms*.

Как было отмечено в разделе 4.1, расчетная сетка в проекте АСКРО имеет цилиндрическую форму. Программный модуль, который отвечает за создание расчетной сетки, должен принимать в качестве входных данных такие параметры, как: высота рассматриваемой области в метрах, радиус рассматриваемой области в метрах и шаг между соседними узлами расчетной сетки.

Важной задачей является выбор шага между узлами расчетной сетки. Согласно [17], точность решения уравнения методом конечных элементов во многом зависит от качества разбиения исходной области на конечные элементы и от числа узлов конечных элементов. Таким образом, чем гуще расчетная сетка, тем ближе решение, полученное численным методом конечных элементов, к аналитическому решению.

Так как радиус рассматриваемой области планируется делать порядка 30 км вокруг источника выброса радиоактивных примесей (вокруг АЭС), делать сетку одинаково большой точности на всей рассматриваемой области не эффективно с точки зрения вычислительных мощностей ЭВМ (электронно - вычислительная машина). Более того, расчет распространения радиоактивных примесей планируется проводить в реальном времени, что накладывает ограничение на время расчета.

В связи с поставленными выше ограничениями, было решено сделать различную густоту расчетной сетки при удалении от источника радиоактивных выбросов. Расчетная сетка должна быть достаточно детальной вблизи АЭС и по мере удаленности от источника радиоактивных выбросов становиться более разреженной. Следовательно, шаг расчетной сетки должен меняться.

В итоге, в соответствии с поставленными выше требованиями, был разработан программный модуль генерации расчетной сетки. Схема разработанного модуля представлена на рисунке 4.2.

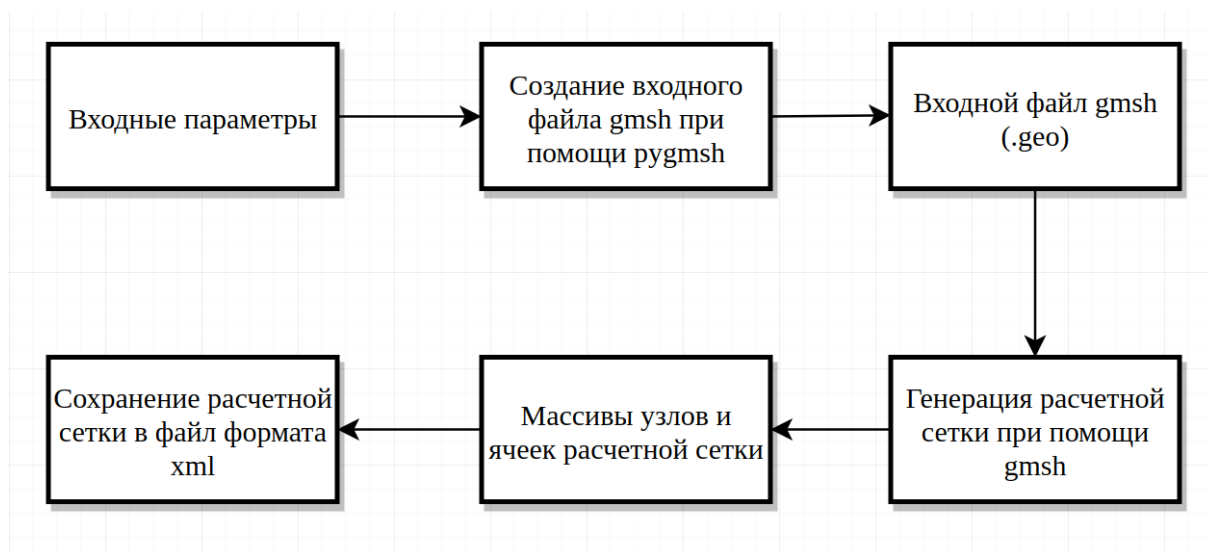


Рисунок 4.2 — Схема модуля генерации расчетной сетки.

На вход модуль принимает следующие параметры, необходимые для создания расчетной сетки: высота и радиус рассматриваемой области вблизи АЭС; список радиусов, для которых будет задан шаг расчетной сетки; список шагов расчетной сетки для каждой области из списка радиусов. Входные параметры задаются в конфигурационном файле проекта.

На втором шаге входные параметры программно считываются при помощи языка программирования Python и на их основе происходит процесс создания входного файла для программы *gmsh*. Для создания входного файла используется библиотека *pygmsh*, которая позволяет при помощи удобных абстракций задать необходимую геометрию расчетной сетки и на основе полученной геометрии сгенерировать файл, содержащий команды на скриптовом языке *gmsh*, в котором детально описываются опорные точки и линии создаваемой геометрии.

Далее, полученный скриптовый файл с расширением *.geo* передается входным параметром программе *gmsh*, которая в свою очередь генерирует расчетную сетку. На выходе программа выдает массив, содержащий информацию об узлах и ячейках построенной расчетной сетки.

В дальнейшем, для численного решения уравнения адвекции-диффузии методом конечных элементов будет использоваться вычислительный пакет *FEniCS*,

который требует, чтобы файл расчетной сетки имел формат *xml*. Для этого, в модуле генерации расчетной сетки присутствует последний шаг, выполняющий сохранение полученных массивов узлов и ячеек сетки в файл формата *xml*.

Пример построенной расчетной сетки при помощи вышеописанного модуля представлен на рисунке 4.3.

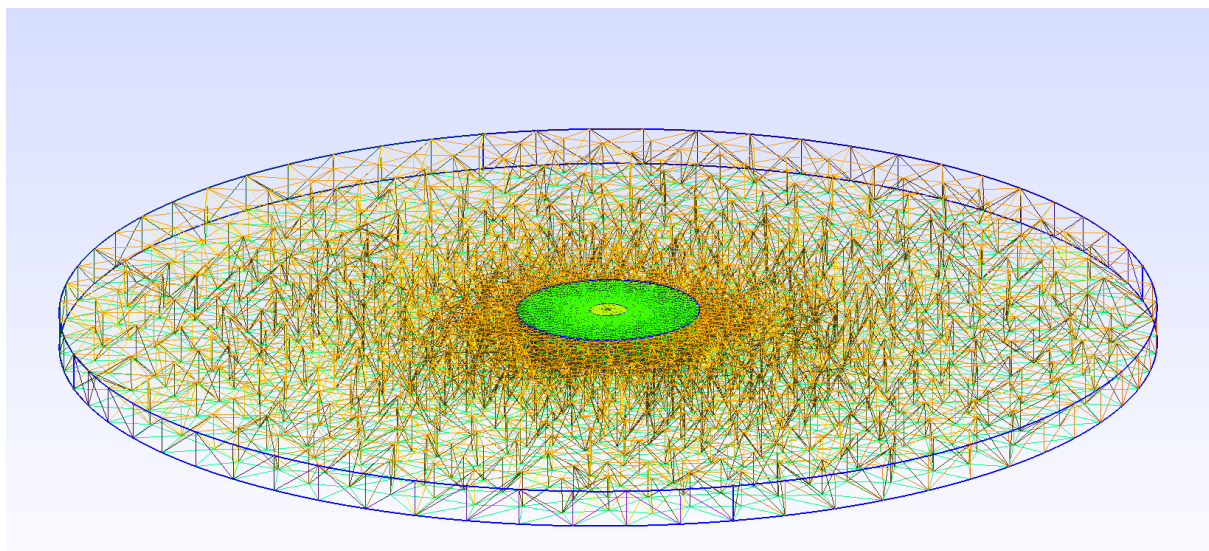


Рисунок 4.3 — Расчетная сетка, построенная при помощи разработанного модуля.

4.3 Аппроксимация свойств местности на узлы расчетной сетки

Ранее в главе 3 был проведен анализ топологической карты местности вблизи АЭС и получена информация о каждом из пикселей топологической карты. Текущей задачей является создание модуля аппроксимации свойств местности на узлы расчетной сетки, разработанной в разделе 4.2, для последующего решения уравнения адвекции-диффузии.

Для начала необходимо определить соответствие координат узлов расчетной сетки и индексов пикселей в массиве, полученном в разделе 4.2. Для этого была разработана функция, которая определяет такое соответствие согласно формуле 4.1.

$$k_i = \frac{x_i + r}{2 \times r/s_i} \quad (4.1)$$

где:

k_i — индекс пикселя в продольном или поперечном направлении;

x_i — продольная или поперечная координата (м);

r — радиус рассматриваемой прилегающей к АЭС местности (м);

s_i — количество пикселей в продольном или поперечном направлении;

$i \in \{x, y\}$.

Далее, на основе полученного соответствия узлов расчетной сетки и индексов пикселей, есть возможность сопоставления типа подстилающей поверхности для сетки на основе таблицы 3.1.

Напоследок, полезно промаркировать каждый из узлов расчетной сетки относительно высоты подстилающей поверхности. Данные о высоте подстилающих поверхностей для рассматриваемых в работе типов местностей представлены в таблице А.1 приложения А.

В конечном итоге, промаркированные узлы расчетной сетки сохраняются в файл формата `.h5` или `.pickle` в зависимости от параметров, заданных в конфигурационном файле.

4.4 Заключение разработки расчетной сетки и аппроксимации свойств местности на её узлы.

В данной главе был описан процесс разработки расчетной сетки. Для создания расчетной сетки использовалась программа *gmsh*, генерирующая расчетную сетку на основе опорных точек и линий, описанных в скриптовом файле *gmsh*. Для упрощения создания скриптового файла *gmsh* использовалась библиотека *pygmsh* для языка программирования Python.

После создания расчетной сетки описывался процесс аппроксимации свойств местности на узлы расчетной сетки. В результате аппроксимации была получена информация о типе местности и положении относительно подстилающей поверхности для каждого из узлов расчетной сетки. Эта информация будет использоваться в дальнейшем при решении уравнения адвекции-диффузии методом конечных элементов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа выполнена в соответствии с индивидуальным заданием по производственной практике, проходимой в Национальном Исследовательском Ядерном Университете «МИФИ» на кафедре № 5.

В рамках производственной практики происходила разработка модели активации теплоносителя первого контура реакторной установки, разработка модуля генерации расчетной сетки и аппроксимации свойств местности на узлы расчетной сетки. Получены новые и более углубленные знания об автоматизированных системах контроля радиационной обстановки вблизи АЭС и приведено их краткое описание.

В ходе производственной практики были решены следующие задачи:

- изучена литература, посвященная активации теплоносителя первого контура реакторной установки, а также программные средства (UNK, FEniCS, Python, Gmsh, pygmsh), необходимые для разработки модели активации теплоносителя первого контура и разработки модели АСКРО;
- представлены основные пути миграции радионуклидов на АЭС при возникновении аварий и внештатных ситуаций. Рассмотрены наиболее важные радионуклиды, которые образуются в процессе работы реактора и в случае внештатных ситуаций могут попасть во внешнюю среду. Приведены цепочки образования наиболее важных радионуклидов в процессе работы реактора. Разработана модель активации теплоносителя первого контура реакторной установки, позволяющая произвести расчет концентраций наиболее значимых радиоактивных нуклидов, которые образуются в теплоносителе первого контура реакторной установки активационным путем или мигрируют в теплоноситель из ТВЭЛов при разгерметизации их оболочек;
- разработан программный модуль анализа свойств местности по данным топологических карт, позволяющий получить информацию о типе прилегающей к АЭС местности в каждой из её точек;
- разработана расчетная сетка, описывающая прилегающую к АЭС местность, для дальнейшего решения уравнения переноса радиоактивных примесей в атмосфере численным методом конечных элементов;
- разработан программный модуль, позволяющий аппроксимировать свойства прилегающей к АЭС местности на узлы расчетной сетки.

В итоге можно сделать вывод о том, что в ходе производственной практики были достигнуты поставленные цели. В дальнейшем, при работе над выпускной квалификационной работой, планируется продолжить работу над проектом разработки модели АСКРО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива: Справочник / В. М. Колобашкин, П. М. Рубцов, П. А. Ружанский и др. М.: Энергоатомиздат, 1980.
2. Гусев Н. Г., Беляев В. А. Радиоактивные выбросы в биосфере: Справочник. — 2-е изд., перераб. и доп.—М.: Энергоатомиздат, 1991.—256 с.
3. Защита от ионизирующих излучений. В 2-х т. Т.2. Защита от излучений ядерно-технических установок: Учебник для вузов / Н. Г. Гусев, Е. Е. Коваленко, В. П. Машкович, А. П. Суворов; под ред. Н. Г. Гусева — 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. Егоров Ю. А. Основы радиационной безопасности атомных электростанций: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Н. А. Доллежала. М.: Энергоиздат, 1982.
5. Сеттон О. Г. Микрометеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1958.
6. Метеорология и атомная энергия: Пер. с англ. / Под ред. Н. Л. Бызовой, К. П. Махонько. Л.: Гидрометеиздат, 1971.
7. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1975.
8. Млявая Г. В. Влияние параметров шероховатости подстилающей поверхности на скорость ветра // Экология и география. Науки о жизни. 2014. № 2(323). С. 181-187.
9. Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases. Exposures of critical groups. IAEA Safety Series N 57. Vienna: IAEA. 1982.
10. Учет дисперсионных параметров атмосферы при выборе площадок для атомных электростанций. Серия изданий по безопасности № 50-SG-53. Вена: МАГАТЭ, 1982.
11. Methodology for Evaluation the Radiological Consequences of Radioactive Effluents Released in Normal Operations. Commission of the European Communities. Doc. N V/3865/79. 1979.
12. General Principles of Calculation for the Radiation Exposure Resulting from Radioactive Effluents in Exhaust Air and in Surface Water. Translation — Safety Codes and Guides. Gesellschaft fur reaktorsicherheit. Koln, 1980. N 11.

13. Лайхтман Д. Л. Физика пограничного слоя атмосферы.—2-е изд. Л.: Гидрометеиздат, 1974.
14. Бызова Н. Л. Рассеяние примеси в пограничном слое атмосферы. М.: Гидрометеиздат, 1974.
15. IAEA. Atmospheric Dispersion and Dose Calculation Techniques. Rep. UCRL-90765. Lawrence Livermore Nat. Laboratory. University of California. Livermore, 1984.
16. Елохин А.П. Автоматизированные системы контроля радиационной обстановки окружающей среды: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 316 с.
17. Даутов Р.З., Карчевский М.М. Введение в теорию метода конечных элементов. Учебное пособие. — Казань: Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова–Ленина, 2004. — 239 с.
18. Langtangen, Hans Petter, Anders Logg, and Aslak Tveito. Solving PDEs in Python: The FEniCS Tutorial I. Springer International Publishing, 2016.
19. Лутц М. Изучаем Python, 4-е издание. – Пер. с англ. – СПб.: Символ-Плюс, 2011. – 1280 с., ил.
20. Geuzaine, Christophe, and Jean-Francois Remacle. "Gmsh reference manual."Free Software Foundation Inc., USA 2003.
21. Pygmsh's documentation [Электронный ресурс]: техническая документация / Библиотека документаций языка программирования Python - Режим доступа: <https://pygmsh.readthedocs.io/en/latest/>, свободный (дата обращения 20.05.2019).
22. Метод конечных элементов [Электронный ресурс]: статья / Свободная энциклопедия Википедия – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_конечных_элементов, свободный (дата обращения: 19.05.2019).
23. Лескин С.Т., Шелегов А.С., Слободчук В.И. Физические особенности и конструкция реактора ВВЭР-1000: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – 116 с.
24. Колпаков Г.Н. Конструкции твэлов, каналов и активных зон энергетических реакторов: учебное пособие / Г.Н. Колпаков, О.В. Селиваникова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 118 с.
25. Бекман И. Н. "Ядерная индустрия."Курс лекций. Лекция 17, 2005.

26. T.Gray, N.Mann. Nuclear isotopes library [Электронный ресурс]: nuclear data / Element Collection, Inc - Режим доступа: <https://periodictable.com/Isotopes/>, свободный (дата обращения 22.09.2019).
27. Наумов В.И. Физические основы безопасности ядерных реакторов: Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. М.: НИЯУ МИФИ. 2013. 148 с.
28. N. Soppera, M. Bossant, E. Dupont. "JANIS 4: An improved version of the NEA java-based nuclear data information system." Nuclear Data Sheets 120 (2014): 294-296.
29. В.Ф. Цибульский, В.Д. Давиденко. Программный комплекс UNK для детального расчета спектра нейтронов в ядерных реакторах. Отчет ИЯР/РНЦ «КИ». Инв.№35-410-4/81 от 18.05.2001. Москва.
30. ГОСТ 6709-72. Вода дистиллированная. Технические условия. — Введ. 1974-01-01.— М.: Изд-во стандартов, 2010.— 12 с.
31. Audi G., Bersillon O., Blachot J., Wapstra A. H. The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties // Nuclear Physics A. — 2003. — Т. 729. — С. 3—128.
32. J. Hoefs, J. Jochen, J. Hoefs. Stable isotope geochemistry. Vol. 285. Berlin: springer, 2009.
33. Крючков Э.Ф., Юрова Л.Н. Теория переноса нейтронов: Учебное пособие. – М.: МИФИ, 2007. – 272 с.
34. Савандер В.И., Увакин М. А., Физическая теория ядерных реакторов. Ч. 1 однородная размножающая среда и теория гетерогенных структур: Учебное пособие. М.: МИФИ, 2007. с.
35. Pillow documentation [Электронный ресурс]: техническая документация / Библиотека документов языка программирования Python - Режим доступа: <https://pillow.readthedocs.io>, свободный (дата обращения 04.09.2019).
36. Н.С. Голубенко. О зависимости скорости ветра от высоты с учетом рельефа местности [Электронный ресурс]: статья – Режим доступа: <https://cutt.ly/AwGPlt2>, свободный (дата обращения: 14.09.2019).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 — Классификация неровностей поверхности и рельефа [8].

№	Вид поверхности	Класс неровности рельефа К	Размер шероховатости Z_0
1.	Водная поверхность (море, озеро); снежная поверхность	0	0,02 см 0,05-0,1 см
2.	Полностью открытый рельеф с гладкой поверхностью (взлетные полосы, ровные поля, скошенная трава)	0,5	0,24-0,5 см
3.	Открытые области с небольшими лесозащитными полосами (равнины или небольшие холмы, пашня, травяные поля); небольшие фермерские постройки, отдельно стоящие деревья или кустарники	1	1-3 см
4.	Ровная, слегка холмистая местность, сельскохозяйственные угодья (поле с высокой растительностью, пшеничное поле) с несколькими зданиями и навесами высотой до 8 м, расположенными друг от друга на расстоянии около 1250 м	0	5 см
5.	Ровная или слегка холмистая территория, хозяйственные земли с разбросанными областями построек и небольшими лесозащитными полосами, среднее расстояние между которыми составляет 1000 м	2	10 см
6.	Сельскохозяйственные угодья с большим количеством зданий или навесами высотой до 8 м, с деревьями, кустарниками, расположенными друг от друга на расстоянии около 250 м	2,5	20-25 см
7.	Территории с очень неровным рельефом, городские застройки, леса или сельскохозяйственные земли с многочисленными близкорасположенными лесозащитными полосами, среднее расстояние между которыми составляет несколько сотен метров; болота с растительностью	3	40 см 60 см
8.	Города с высокими зданиями	3,5	80-150 см
9.	Большие города, мегаполисы с высокими зданиями и небоскребами	4	160-200 см

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б.1 — Основные характеристики радионуклидов, образующися в топливе.

Нуклид	A_i^0 , Бк/кг	Z_i	γ_i
I-131	$3,000 \times 10^6$	6,0	$2,88 \times 10^{-2}$
I-132	$2,072 \times 10^6$	1,0	$1,15 \times 10^{-2}$
I-133	$6,290 \times 10^5$	1,0	$6,70 \times 10^{-2}$
I-134	$3,700 \times 10^6$	1,0	$3,93 \times 10^{-2}$
I-135	$1,590 \times 10^6$	1,0	$6,28 \times 10^{-2}$
Cs-134	$7,770 \times 10^2$	1,0	$7,71 \times 10^{-8}$
Cs-137	$1,600 \times 10^4$	1,0	$6,23 \times 10^{-2}$
Cs-138	$4,100 \times 10^5$	0,2	Продукт распада Xe-138
Rb-88	$4,100 \times 10^5$	4,0	Продукт распада Kr-88
Xe-133	$2,500 \times 10^5$	19,0	$6,70 \times 10^{-2}$
Xe-135	$2,738 \times 10^6$	1,0	$2,68 \times 10^{-3}$
Xe-137	$1,406 \times 10^6$	1,0	$7,74 \times 10^{-2}$
Xe-138	$1,600 \times 10^5$	3,0	$1,20 \times 10^{-2}$
Kr-85	$2,500 \times 10^5$	1,0	$1,30 \times 10^{-2}$
Kr-87	$7,030 \times 10^5$	1,0	$3,64 \times 10^{-2}$
Kr-88	$1,600 \times 10^5$	4,0	$3,64 \times 10^{-2}$
H-3	$3,700 \times 10^7$	1,0	$1,70 \times 10^{-9}$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

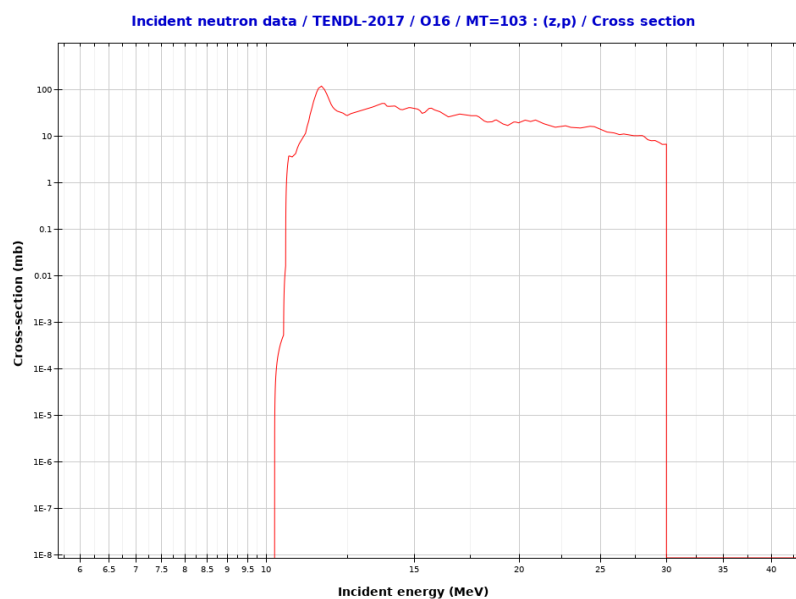


Рисунок В.1 — Энергетическая зависимость микроскопического сечения реакции (n, p) на ядре ^{16}O [28].

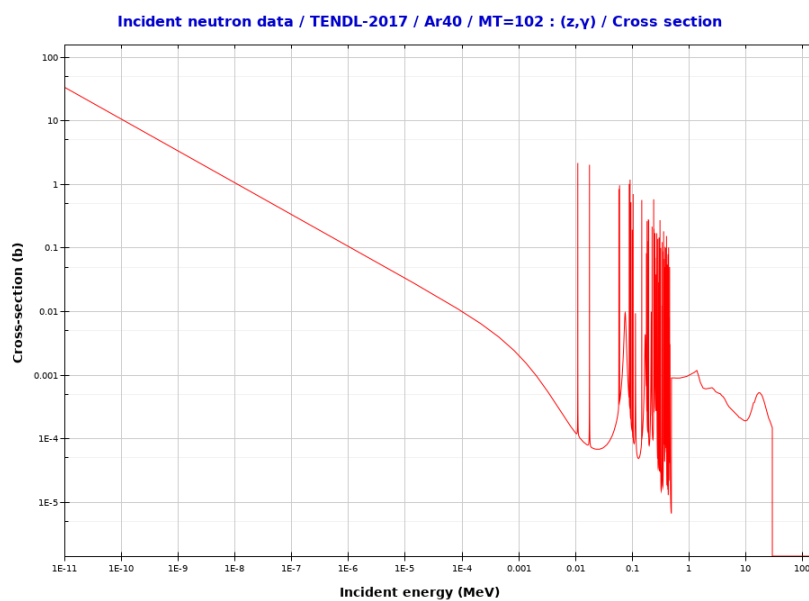


Рисунок В.2 — Энергетическая зависимость микроскопического сечения реакции (n, γ) на ядре ^{40}Ar [28].

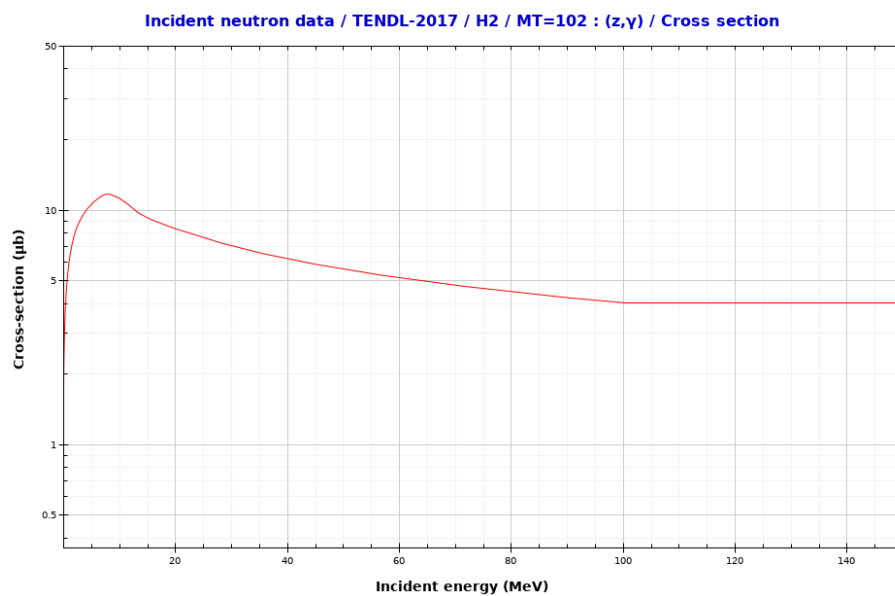


Рисунок В.3 — Энергетическая зависимость микроскопического сечения реакции (n, γ) на ядре ^2H [28].

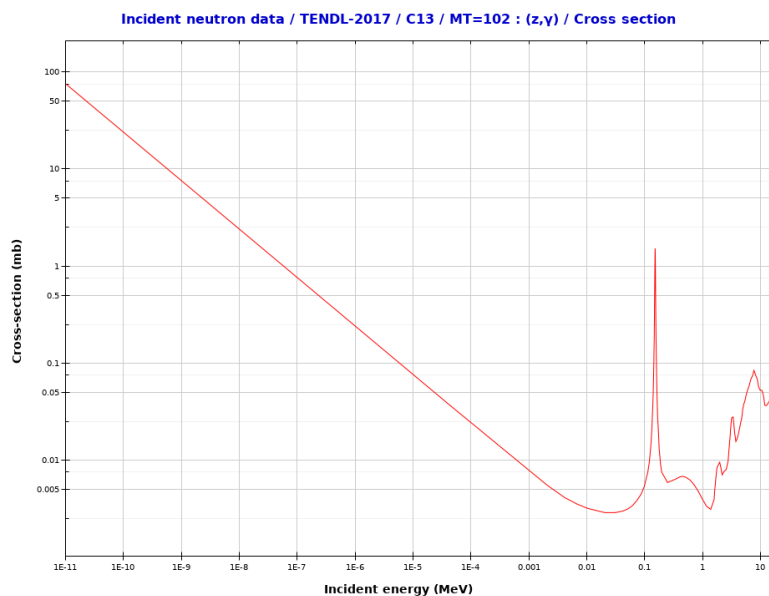


Рисунок В.4 — Энергетическая зависимость микроскопического сечения реакции (n, γ) на ядре ^{13}C [28].

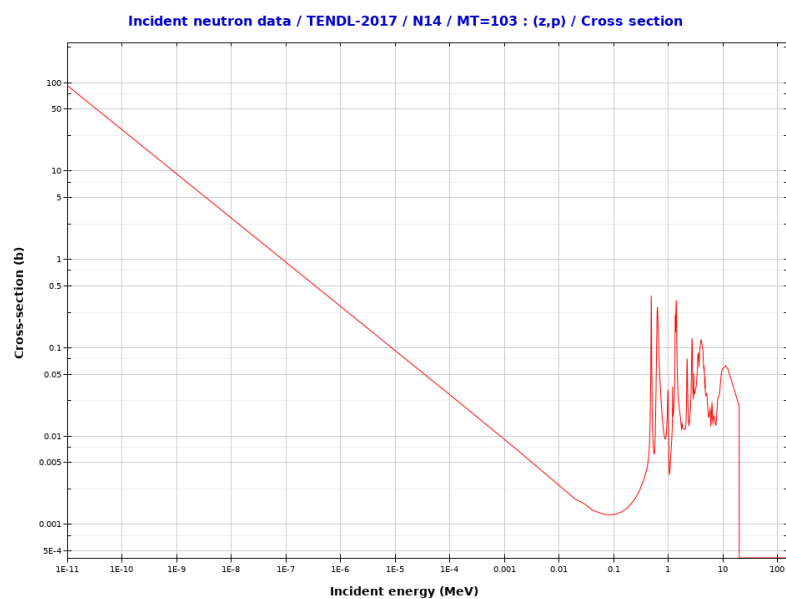


Рисунок В.5 — Энергетическая зависимость микроскопического сечения реакции (n, p) на ядре ^{14}N [28].

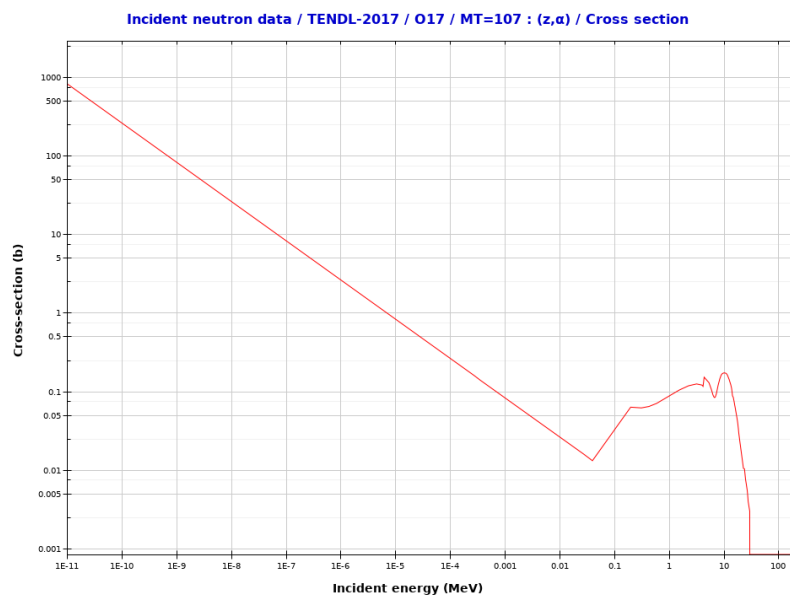


Рисунок В.6 — Энергетическая зависимость микроскопического сечения реакции (n, α) на ядре ^{17}O [28].

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица Г.1 — Параметры основных радионуклидов, образующихся в теплоносителе первого контура в результате активации нейтронами естественных примесей

Нуклид	$T_{1/2}$	Родитель	Реакция	$\sigma_i^{(2),j}$, барн	$\sigma_i^{(1),j}$, барн	Доля родителя в теплоноси- теле
^{16}N	7,13 секунд	^{16}O	(n, p)	0,0	$1,0 \times 10^{-29}$	1
^{41}Ar	1,83 часов	^{40}Ar	(n, γ)	$2,9 \times 10^{-25}$	$5,2 \times 10^{-27}$	7×10^{-6}
^3H	12,32 лет	^2H	(n, γ)	$2,5 \times 10^{-28}$	$3,6 \times 10^{-30}$	$2,3 \times 10^{-2}$
^{14}C	5730 лет	^{13}C	(n, γ)	$2,3 \times 10^{-25}$	$1,5 \times 10^{-27}$	$5,0 \times 10^{-6}$
		^{17}O	(n, α)	$2,4 \times 10^{-25}$	$2,9 \times 10^{-26}$	$3,7 \times 10^{-2}$
		^{14}N	(n, p)	$2,3 \times 10^{-25}$	$2,0 \times 10^{-26}$	$2,0 \times 10^{-6}$

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Листинг Д.1 — Исходный код модуля генерации расчетной сетки и её маркировки

```
import os
import sys
from typing import List, Dict

import h5py
import pickle
import meshio
import numpy as np
import pygmsh
from PIL import Image

from config import Config

class Cylinder:
    def __init__(self, radius, height, mesh_size):
        self.radius = radius
        self.height = height
        self.mesh_size = mesh_size

class GmshCylinder:
    def __init__(self, points, circles, circle_ll, lines, surface_ll, surfaces, plane_surfaces, \
        surface_loop, volume):
        self.points = points
        self.circles = circles
        self.circles_ll = circle_ll
        self.lines = lines
        self.surface_ll = surface_ll
        self.surfaces = surfaces
        self.plane_surfaces = plane_surfaces
        self.surface_loop = surface_loop
        self.volume = volume

class MeshGenerator:
    gmsh_cylinders: np.array
    geometry: pygmsh.built_in.Geometry
    points_2d: np.array
    points_3d: np.array
    cells_2d: Dict
    cells_3d: Dict
    img_pixels: object
    pix_width: int
    pix_height: int
    img_center: List
    radius_pix: int
    radius: int
    scale: float
    phys_coords: np.array
    phys_types: np.array
    k: np.array
    marked_points_2d: np.array
    marked_points_3d: np.array
```

```

def __init__(self, config_file):

    self.cfg = Config(config_file)
    self.cfg.init_mesh()
    self.cfg.init_pic()
    self.cfg.init_soft()
    self.cfg.init_koef()

    self.__init_cylinders()
    self.__init_image()

    self.coords2pix = lambda coords, w, h: \
        (coords + self.radius) \
        / np.array([2 * self.radius / w, 2 * self.radius / h])

def __init_cylinders(self):
    self.cylinders = []
    for i in range(len(self.cfg.radius_list)):
        cylinder = Cylinder(
            self.cfg.radius_list[i],
            self.cfg.h,
            self.cfg.step[i]
        )
        self.cylinders.append(cylinder)

def __init_image(self):
    rgb_img = Image.open(self.cfg.image_path).convert("RGB")
    self.img_pixels = rgb_img.load()
    self.img_pixels_np = np.array(rgb_img)
    self.pix_width = rgb_img.width
    self.pix_height = rgb_img.height
    self.img_center = [int(self.pix_width / 2), int(self.pix_height / 2)]
    self.radius_pix = int(min([self.pix_width, self.pix_height]) / 2)
    self.radius = self.cfg.radius_list[-1]
    self.scale = self.radius / (2 * self.radius_pix)

def generate_and_save(self):
    self.__generate_mesh()
    self.__save_xml_mesh()
    self.__mark_mesh()
    self.__save_marked_mesh()

def __get_coords_colors(self, points):
    pix2d = np.zeros([points.shape[0], 2], dtype=np.int)
    pix2d[...] = self.coords2pix(points[:, 0:2], self.pix_width, self.pix_height)[...]
    ix1 = np.where(pix2d.T[0] == self.pix_width)[0]
    for ix in ix1:
        pix2d[ix][0] = self.pix_width - 1
    iy1 = np.where(pix2d.T[1] == self.pix_height)[0]
    for iy in iy1:
        pix2d[iy][1] = self.pix_height - 1

    colors = self.img_pixels_np[pix2d.T[1], pix2d.T[0]]
    return colors

def __mark_2d_mesh(self):
    self.marked_points_2d["surf_type"][:] = self.cfg.marks[self.cfg.default_mark]
    self.marked_points_2d["z0_position"][:] = 1
    self.marked_points_2d["x"][:] = self.points_2d.T[0]
    self.marked_points_2d["y"][:] = self.points_2d.T[1]

```

```

self.marked_points_2d["z"][:] = self.points_2d.T[2]
colors2d = self.__get_coords_colors(self.points_2d)
for k, color in self.cfg.rgb.items():
    indexes = np.where((colors2d[:,0]==color[0]) & (colors2d[:,1]==color[1]) \
        & (colors2d[:,2]==color[2]))[0]
    self.marked_points_2d["surf_type"][indexes] = self.cfg.marks[k]

def __mark_3d_mesh(self):
    self.marked_points_3d["surf_type"][:] = self.cfg.marks[self.cfg.default_mark]
    self.marked_points_3d["x"][:] = self.points_3d.T[0]
    self.marked_points_3d["y"][:] = self.points_3d.T[1]
    self.marked_points_3d["z"][:] = self.points_3d.T[2]

    colors3d = self.__get_coords_colors(self.points_3d)
    for k, color in self.cfg.rgb.items():
        indexes = np.where((colors3d[:,0]==color[0]) & (colors3d[:,1]==color[1]) \
            & (colors3d[:,2]==color[2]))[0]
        self.marked_points_3d["surf_type"][indexes] = self.cfg.marks[k]

    self.marked_points_3d["z0_position"][:] = 0
    for k, z0 in self.cfg.z0.items():
        indexes = np.where((self.points_3d.T[2]<=z0) \
            & (self.marked_points_3d["surf_type"]==k.encode()))[0]
        self.marked_points_3d["z0_position"][indexes] = 1

    for m in self.cfg.marks.values():
        indexes = np.where(self.marked_points_3d["surf_type"]==m.encode())[0]
        self.marked_points_3d["k"][indexes] = self.cfg.k[m]

    for m in self.cfg.marks.values():
        for atm_type, hmax in self.cfg.H_max_list.items():
            indexes = np.where((self.marked_points_3d["surf_type"] == m.encode()) &
                (self.marked_points_3d["z0_position"]==0) &
                (self.marked_points_3d["z"]<hmax))[0]
            self.wind_destrib[atm_type][indexes] = (self.marked_points_3d["z"][indexes] \
                / self.cfg.H0)**self.cfg.k[m]
            indexes = np.where((self.marked_points_3d["surf_type"] == m.encode()) &
                (self.marked_points_3d["z"]>=hmax))[0]
            self.wind_destrib[atm_type][indexes] = (hmax / self.cfg.H0)**self.cfg.k[m]

def __generate_mesh(self):
    self.__create_geometry()
    mesh_3d = pygmsh.generate_mesh(self.geometry, remove_faces=True, gmsh_path=self.cfg.gmsh_path, \
        geo_filename="example.geo")
    self.points_3d, self.cells_3d = mesh_3d.points, mesh_3d.cells
    self.__mark_bottom_surface()
    mesh_2d = pygmsh.generate_mesh(self.geometry, remove_faces=True, dim=2, \
        gmsh_path=self.cfg.gmsh_path)
    self.points_2d, self.cells_2d = mesh_2d.points, mesh_2d.cells

def __save_xml_mesh(self):
    meshio.write_points_cells(self.cfg.xml_2d_path, self.points_2d, self.cells_2d)
    meshio.write_points_cells(self.cfg.xml_3d_path, self.points_3d, self.cells_3d)

def __mark_mesh(self):
    self.marked_points_2d = np.zeros(self.points_2d.shape[0],
        dtype=[('x', np.float), ('y', np.float), ('z', np.float), \
            ('surf_type', np.str), ('z0_position', np.int)])
    self.marked_points_3d = np.zeros(self.points_3d.shape[0],
        dtype=[('x', np.float), ('y', np.float), ('z', np.float), \

```

```

        ('surf_type', np.str), ('z0_position', np.int), ('k', np.float)])
self.wind_destrib = np.zeros(self.points_3d.shape[0],
                              dtype=[('A', np.float), ('B', np.float), ('C', np.float), \
                                      ('D', np.float), ('E', np.float), ('F', np.float), ('G', np.float)])
self.__mark_2d_mesh()
self.__mark_3d_mesh()

def __save_marked_mesh(self):
    ext = os.path.splitext(self.cfg.mesh_path)
    if ext == ".h5":
        with h5py.File(self.cfg.mesh_path, 'w') as f:
            f.create_dataset(name="2D_COORDS", data=self.marked_points_2d)
            f.create_dataset(name="3D_COORDS", data=self.marked_points_3d)
            f.create_dataset(name="WIND", data=self.wind_destrib)
            f.flush()
    else:
        d = {
            "2D_COORDS": self.marked_points_2d,
            "3D_COORDS": self.marked_points_3d,
            "WIND": self.wind_destrib
        }
        with open(self.cfg.mesh_path, "wb") as f:
            pickle.dump(d, f)
            f.flush()

def __create_geometry(self):
    self.geometry = pygmsh.built_in.Geometry()
    self.gmsh_cylinders = []
    for cylinder in self.cylinders:
        self.gmsh_cylinders.append(
            self.__add_cylinder(cylinder, self.gmsh_cylinders[-1] if len(self.gmsh_cylinders) \
                               != 0 else None)
        )

def __mark_bottom_surface(self):
    bottom_surfaces = [cylinder.plane_surfaces[0] for cylinder in self.gmsh_cylinders]
    center_point = self.gmsh_cylinders[0].points[0]
    self.geometry.add_physical_surface(bottom_surfaces)
    self.geometry.add_physical_point(center_point)

def __add_cylinder(self, cylinder, prev_cylinder):
    base_coords = [
        np.array([0.0, 0.0, 0.0]),
        np.array([0.0, 0.0, cylinder.height]),
    ]

    coords = [
        np.array([cylinder.radius, 0.0, 0.0]),
        np.array([0.0, cylinder.radius, 0.0]),
        np.array([-cylinder.radius, 0.0, 0.0]),
        np.array([0.0, -cylinder.radius, 0.0]),
        np.array([cylinder.radius, 0.0, cylinder.height]),
        np.array([0.0, cylinder.radius, cylinder.height]),
        np.array([-cylinder.radius, 0.0, cylinder.height]),
        np.array([0.0, -cylinder.radius, cylinder.height])
    ]

    circle_points_idx = [
        np.array([2, 0, 3]),
        np.array([3, 0, 4]),
        np.array([4, 0, 5]),
    ]

```

```

        np.array([5, 0, 2]),

        np.array([6, 1, 7]),
        np.array([7, 1, 8]),
        np.array([8, 1, 9]),
        np.array([9, 1, 6])
    ]

    circles_line_loop_idx = [
        np.array([0, 1, 2, 3]),
        np.array([4, 5, 6, 7]),
    ]

    line_points_idx = [
        np.array([6, 2]),
        np.array([7, 3]),
        np.array([8, 4]),
        np.array([9, 5]),
    ]

    surfaces_line_loop_idx = [
        np.array([0, 0, 1, 4]),
        np.array([1, 1, 2, 5]),
        np.array([2, 2, 3, 6]),
        np.array([3, 3, 0, 7])
    ]

    points = self.__create_points(base_coords, coords, cylinder.mesh_size, prev_cylinder)
    circles = self.__create_circles(points, circle_points_idx)
    circle_ll = self.__create_circle_line_loops(circles, circles_line_loop_idx)
    lines = self.__create_lines(points, line_points_idx)
    surface_ll = self.__create_surface_line_loops(lines, circles, surfaces_line_loop_idx)
    surfaces = self.__create_surfaces(surface_ll)
    plane_surfaces = self.__create_plane_surfaces(circle_ll, prev_cylinder)
    surface_loop = self.__create_surface_loop(surfaces, plane_surfaces, prev_cylinder)
    volume = self.__create_volume(surface_loop)

    return GmshCylinder(points, circles, circle_ll, lines, surface_ll,
                        surfaces, plane_surfaces, surface_loop, volume)

def __create_points(self, base_coords, point_coords, lcar, prev_cylinder):
    points = [self.geometry.add_point(point, lcar=lcar) for point in point_coords]
    if prev_cylinder is not None:
        points = [prev_cylinder.points[0], prev_cylinder.points[1]] + points
    else:
        points = [self.geometry.add_point(point, lcar=0.0) for point in base_coords] + points
    return points

def __create_circles(self, points, circle_points_idx):
    circles = [
        self.geometry.add_circle_arc(points[idx[0]], points[idx[1]], points[idx[2]])
        for idx in circle_points_idx
    ]
    return circles

def __create_circle_line_loops(self, circles, circle_ll_idx):
    circle_ll = [
        self.geometry.add_line_loop([circles[idx[0]], circles[idx[1]], circles[idx[2]], \
            circles[idx[3]]])
        for idx in circle_ll_idx
    ]

```

```

        return circle_ll

def __create_lines(self, points, line_points_idx):
    lines = [self.geometry.add_line(points[idx[0]], points[idx[1]]) for idx in line_points_idx]
    return lines

def __create_surface_line_loops(self, lines, circles, surfaces_line_loop_idx):
    surface_line_loops = [
        self.geometry.add_line_loop([lines[idx[0]], circles[idx[1]], -lines[idx[2]], \
            -circles[idx[3]]])
        for idx in surfaces_line_loop_idx
    ]
    return surface_line_loops

def __create_surfaces(self, surface_line_loops):
    surfaces = [self.geometry.add_surface(surface) for surface in surface_line_loops]
    return surfaces

def __create_plane_surfaces(self, circle_line_loops, prev_cylinder):
    if prev_cylinder is None:
        plane_surfaces = [self.geometry.add_plane_surface(circle_loop) for circle_loop in \
            circle_line_loops]
    else:
        plane_surfaces = [
            self.geometry.add_plane_surface(circle_loop, [prev_cylinder.circles_ll[i]])
            for i, circle_loop in enumerate(circle_line_loops)
        ]
    return plane_surfaces

def __create_surface_loop(self, surfaces, plane_surfaces, prev_cylinder):
    if prev_cylinder is None:
        surface_loop = self.geometry.add_surface_loop([plane_surfaces[0], *surfaces, \
            plane_surfaces[1]])
    else:
        surface_loop = self.geometry.add_surface_loop(
            [plane_surfaces[0], *surfaces, plane_surfaces[1], *prev_cylinder.surfaces]
        )
    return surface_loop

def __create_volume(self, surface_loop):
    volume = self.geometry.add_volume(surface_loop)
    return volume

```