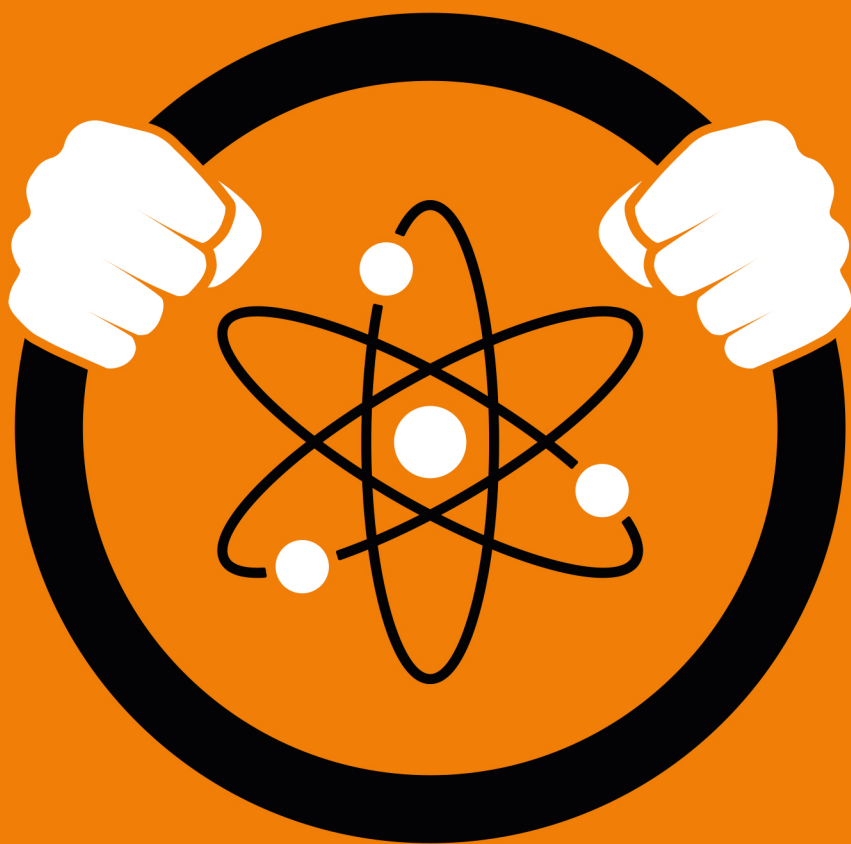


Колин Таккер

Как управлять  
**ядерным**  
**реактором**



Колин Таккер

# **Как управлять ядерным реактором**

Colin Tucker

# How to Drive a Nuclear Reactor

 Springer

Колин Таккер

# Как управлять ядерным реактором



Москва, 2022

УДК 621.039.5  
ББК 31.46  
Т15

**Таккер К.**

Т15 Как управлять ядерным реактором / пер. с англ. А. Н. Рабодзей. – М.: ДМК Пресс, 2022. – 230 с.: ил.

**ISBN 978-5-93700-132-0**

Эта книга объясняет, как устроен и как действует ядерный реактор и что нужно знать его оператору для обеспечения стабильной и безопасной работы. Коротко изложена история развития ядерных реакторов, представлены различные их типы и подробно рассмотрен один из них – водо-водяной реактор (PWR), начиная с конструкции и заканчивая особенностями управления. Автор книги, признанный эксперт в области безопасной эксплуатации реакторов, уделяет особое внимание устранению аварийных ситуаций.

Книга предназначена широкому кругу читателей, интересующихся современной физикой и энергетикой.

УДК 621.039.5  
ББК 31.46

First published in English under the title *How to Drive a Nuclear Reactor* by Colin Tucker, edition: 1. Copyright © Springer Nature Switzerland AG, 2019. This edition has been translated and published under licence from Springer Nature Switzerland AG. Springer Nature Switzerland AG takes no responsibility and shall not be made liable for the accuracy of the translation.

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN 978-3-030-33875-6 (англ.)  
ISBN 978-5-93700-132-0 (рус.)

© Springer Nature Switzerland AG, 2019  
© Перевод, оформление, издание,  
ДМК Пресс, 2022

# Содержание

<b>От издательства</b> .....	10
<b>Предисловие и благодарности</b> .....	11
<b>Глава 1. Человек и его собака</b> .....	13
1.1. Чтение этой книги не даст вам необходимой квалификации для управления ядерным реактором .....	13
1.2. Что включает в себя эта книга .....	15
1.3. Три основных понятия .....	16
1.4. И в заключение .....	16
<b>Глава 2. Физика – это интересно!</b> .....	17
2.1. Атомы и их ядра .....	17
2.2. Распад .....	19
2.3. Быстрые и медленные нейтроны .....	20
2.4. Цепная реакция .....	21
<b>Глава 3. Подружитесь с нейтронами</b> .....	23
3.1. Введение в реактивность .....	23
3.2. Найлы и миллинайлы .....	25
3.3. Топливо для реакторов .....	25
3.4. Стержни регулирования .....	28
3.5. Точка кипения воды .....	29
<b>Глава 4. Критичность не так плоха, как о ней говорят</b> .....	31
4.1. Критичность: одна из фантастически величайших ошибок .....	31
4.2. Начало докритического состояния: выключение реактора .....	31
4.3. Приближение к критичности .....	32
4.4. Надкритический режим: также нет проблем .....	34
4.5. Быстрые и запаздывающие нейтроны .....	35
4.6. Чикаго Пайл 1 (CP-1) .....	35
<b>Глава 5. Что делает ядерную энергию особенной?</b> .....	39
5.1. Компактный источник энергии .....	39
5.2. Продукты распада .....	41
5.3. Остаточное тепловыделение .....	44
5.4. Самое плохое, что может случиться .....	45
<b>Глава 6. Из каких частей состоит реактор</b> .....	46
6.1. Корпус реактора .....	48
6.2. Парогенератор .....	50
6.3. Главный циркуляционный насос .....	51

6.4. Компенсатор давления.....	53
6.5. Установка всего вместе.....	54
6.6. Внутри «коробки».....	55
6.7. Некоторые цифры .....	56
<b>Глава 7. Выведение и введение стержней управления .....</b>	<b>57</b>
7.1. Когда стартовать? .....	57
7.2. Вы защищены?.....	59
7.3. Прогнозирование критичности .....	59
7.4. Изменение содержания бора.....	60
7.5. Первые шаги.....	62
7.6. Приближение к критическому режиму.....	63
7.7. Ожидание критического режима .....	65
7.8. Удвоенное время и скорость запуска .....	66
7.9. И что дальше?.....	66
<b>Глава 8. Сколько ватт? .....</b>	<b>68</b>
8.1. Три проблемы с потоком нейтронов .....	69
8.2. Азот-16.....	73
8.3. Использование тепла в первом контуре.....	74
8.4. Использование тепла во втором контуре.....	76
8.5. Почему не работают прямые способы измерения электрической мощности .....	77
8.6. Назад, к делению .....	77
<b>Глава 9. Стабильность реактора (часть первая).....</b>	<b>79</b>
9.1. Температура топлива .....	79
9.2. Температура замедлителя .....	82
9.3. Это PWR, и он стабилен.....	84
9.4. Другой коэффициент.....	85
9.5. Чернобыльский реактор № 4, 26 апреля.....	85
9.6. Помните, что у вас PWR .....	87
<b>Глава 10. Что можно сделать со всем этим паром .....</b>	<b>88</b>
10.1. Парогенератор: взгляд с другой стороны... ..	88
10.2. Главный паропровод.....	90
10.3. Паровые турбины .....	92
10.4. Турбина высокого давления .....	94
10.5. Повторное использование пара.....	95
10.6. Конденсатор.....	96
10.7. Путь назад.....	97
10.8. Генератор.....	98
10.9. Взгляд сверху на систему охлаждения электростанции .....	98
<b>Глава 11. Большая красная кнопка .....</b>	<b>100</b>
11.1. Что дальше?.....	101

11.2. Аварийная остановка.....	102
11.3. Что делают в главном пульте управления.....	103
11.4. Сколько реакторов в мире? .....	107

## **Глава 12. Стабильность реактора (часть вторая).....** 108

12.1. Условия работы парогенератора.....	108
12.2. Передача тепла .....	109
12.3. Практический пример: малые изменения электрической мощности.....	110
12.4. Программируемое удержание мощности .....	111
12.5. Сброс пара .....	113
12.6. И наконец...бор.....	115
12.7. Процедура разведения бора .....	116

## **Глава 13. Выход на новый уровень .....** 118

13.1. Стабильность при малой мощности .....	118
13.2. Обращение с турбиной.....	119
13.3. Запуск вращения .....	120
13.4. Синхронизация .....	121
13.5. Увеличение мощности турбины .....	124

## **Глава 14. Приступим!.....** 125

14.1. Увеличение мощности реактора.....	125
14.3. Распределение мощности.....	126
14.4. Йод и ксенон .....	128
14.5. Накопление ксенона .....	129
14.6. Ксенон после остановки .....	130
14.7. Январские распродажи .....	131

## **Глава 15. Мощность, и как ею управлять.....** 132

15.1. Набор инструментов.....	132
15.2. Практический пример: значительное уменьшение мощности.....	132
15.3. Что делать в реальности.....	134
15.4. Контроль аксиального распределения мощности .....	134
15.5. И ксенон.....	135
15.6. Гибкая работа.....	136
15.7. Следование за нагрузкой.....	138
15.8. Посмотрим вперед.....	139

## **Глава 16. Стационарная мощность – и все?.....** 140

16.1. Слово Q .....	140
16.2. Выгорание .....	140
16.3. Первый контур.....	142
16.4. Парогенератор .....	144
16.5. Расход пара.....	145
16.6. Что еще можно сделать? .....	146
16.7. Предсказание критического режима.....	147

<b>Глава 17. Это все о безопасности</b> .....	150
17.1. Интервью .....	150
17.2. Строительство моста .....	150
17.3. Декларация безопасности .....	151
17.4. Что можно сделать неверно с PWR? .....	153
17.5. Три «С» .....	154
17.6. Автоматическая защита .....	154
17.7. Инженерно-технические средства безопасности .....	155
17.8. Сколько безопасности означает «достаточно безопасности»? .....	156
17.9. Пожар на Уиндскэйл .....	157
17.10. Интернациональные перспективы .....	159
17.11. Допустимый риск .....	160
17.12. Только маленький .....	161
<b>Глава 18. Что может пойти не так (и что с этим делать)</b> .....	162
18.1. Можете ли вы справиться? .....	162
18.2. Авария 1: потеря электросети .....	163
18.3. Естественная циркуляция .....	164
18.4. Аккумуляторы и аварийные электрогенераторы .....	165
18.5. Насосы и прочее .....	167
18.6. Восстановление после потери электросети .....	167
18.7. Авария 2: большая потеря теплоносителя .....	168
18.8. Аварийная инъекция воды .....	169
<b>Глава 19. Меньше не всегда легче</b> .....	173
19.1. Авария 3: малая потеря охлаждающей жидкости .....	173
19.2. Выбор оператора .....	174
19.3. Поиск баланса .....	175
19.4. Движение вверх и вниз .....	176
19.5. Маленькая LOCA, большие проблемы .....	178
19.6. Авария 4: утечка в трубах парогенератора .....	179
19.7. Насколько это приемлемо? .....	182
<b>Глава 20. Что еще можно сделать неправильно?</b> .....	183
20.1. Авария 5: поломка главного паропровода .....	183
20.2. Авария 6: тяжелые аварии .....	185
20.3. Фукусима Дайити .....	187
20.4. В перспективе .....	188
20.5. Что делать с тяжелыми авариями .....	188
<b>Глава 21. Когда теряется сила</b> .....	189
21.1. Выбег .....	189
21.2. Остановка реактора .....	190
21.3. Охлаждение .....	191
21.4. Главные циркуляционные насосы .....	192
21.5. Бор .....	193

21.6. Химики главные .....	194
21.7. Охлаждение в охлажденном состоянии .....	194
21.8. Поднимание крышки реактора .....	195
21.9. Топливо вынимаем, перетасовываем, заправляем .....	197
21.10. Путь назад .....	199
21.11. Физические испытания .....	199
21.12. В будущем .....	200
<b>Глава 22. Есть и другие конструкции реакторов .....</b>	<b>201</b>
22.1. Немного истории .....	201
22.2. Реакторы с водой под давлением (PWR) .....	203
22.3. Ядерные реакторы на кипящей воде .....	203
22.4. Реакторы CANDU .....	204
22.5. Реакторы MAGNOX .....	206
22.6. Усовершенствованный реактор с газовым охлаждением (AGR) .....	207
22.7. Реактор РБМК .....	209
22.8. Реактор на быстрых нейтронах .....	210
22.9. Торий .....	212
22.10. Реакторы на бумаге .....	212
22.11. И победителем становится .....	214
22.12. Не принимайте мои слова на веру .....	214
<b>Глава 23. Как построить собственный реактор .....</b>	<b>215</b>
23.1. Во-первых, топливо .....	215
23.2. Плутоний .....	215
23.3. Обогащенный уран .....	216
23.4. Договор о нераспространении ядерного оружия .....	216
23.5. Природный уран .....	217
23.6. Этого никогда не будет .....	218
23.7. А кто-нибудь пытался? .....	219
<b>Глава 24. И еще кое-что .....</b>	<b>220</b>
24.1. Одна маленькая книга .....	220
24.2. Не только операторы .....	220
24.3. Использованное топливо .....	221
24.4. ...и радиоактивные отходы .....	222
24.5. В конце жизни .....	223
24.6. Вне электросети? .....	224
24.7. Книги, аварии и оружие .....	224
24.8. Политика и агитация .....	225
<b>Глава 25. Заключение .....</b>	<b>226</b>
<b>Предметный указатель .....</b>	<b>228</b>

# От издательства

## ***Отзывы и пожелания***

Мы всегда рады отзывам наших читателей. Расскажите нам, что вы думаете об этой книге, – что понравилось или, может быть, не понравилось. Отзывы важны для нас, чтобы выпускать книги, которые будут для вас максимально полезны.

Вы можете написать отзыв на нашем сайте [www.dmkpress.com](http://www.dmkpress.com), зайдя на страницу книги и оставив комментарий в разделе «Отзывы и рецензии». Также можно послать письмо главному редактору по адресу [dmkpress@gmail.com](mailto:dmkpress@gmail.com); при этом укажите название книги в теме письма.

Если вы являетесь экспертом в какой-либо области и заинтересованы в написании новой книги, заполните форму на нашем сайте по адресу [http://dmkpress.com/authors/publish\\_book/](http://dmkpress.com/authors/publish_book/) или напишите в издательство по адресу [dmkpress@gmail.com](mailto:dmkpress@gmail.com).

## ***Список опечаток***

Хотя мы приняли все возможные меры для того, чтобы обеспечить высокое качество наших текстов, ошибки все равно случаются. Если вы найдете ошибку в одной из наших книг, мы будем очень благодарны, если вы сообщите о ней главному редактору по адресу [dmkpress@gmail.com](mailto:dmkpress@gmail.com). Сделав это, вы избавите других читателей от недопонимания и поможете нам улучшить последующие издания этой книги.

## ***Нарушение авторских прав***

Пиратство в интернете по-прежнему остается насущной проблемой. Издательство «ДМК Пресс» очень серьезно относится к вопросам защиты авторских прав и лицензирования. Если вы столкнетесь в интернете с незаконной публикацией какой-либо из наших книг, пожалуйста, пришлите нам ссылку на интернет-ресурс, чтобы мы могли применить санкции.

Ссылку на подозрительные материалы можно прислать по адресу электронной почты [dmkpress@gmail.com](mailto:dmkpress@gmail.com).

Мы высоко ценим любую помощь по защите наших авторов, благодаря которой мы можем предоставлять вам качественные материалы.

# Предисловие и благодарности

Вы когда-нибудь интересовались, как работает атомная электростанция? Эта книга покажет на примере водо-водяного реактора, одного из наиболее распространенных в мире, какие вопросы возникают у обучающихся профессии «оператор ядерного реактора». Я также покажу вам путь от теории ядерных реакторов к практике через их запуск, работу и выключение. По этой дороге вы познакомитесь немного с конструированием, историей развития ядерных реакторов, различными их типами и с тем, что может быть неправильно с ними. Эта книга покажет, как обеспечить безопасность реакторов и на что надо обращать внимание при управлении ими.

Что побудило меня написать эту книгу? Все началось с обсуждения книги «Как управлять паровозом» Брайана Холлингсворта (Brian Hollingsworth). Я описал друзьям, как автор поднимал читателей на площадку машиниста локомотива и затем постепенно погружал их в вопросы управления: что надо делать и что может быть неправильно. К концу книги возникало чувство, что вы там взаправду находитесь. Когда обсуждение закончилось, я испытал сожаление, что нет подобной книги о ядерных реакторах. Я искал подобную книгу, но нашел только то, что касалось энергетической политики или аварий на ядерных объектах, с несколькими короткими главами об обращении с реакторами, т. е. мне казалось, исходя из личного опыта, люди часто хотели бы знать больше.

Вот так я решил написать эту книгу. Надеюсь, что читатели получат такое же удовольствие от чтения, как и я при написании книги. (Предоставляю вам возможность судить, прав я или нет.)

Как и во многих отраслях промышленности, в атомной энергетике широко распространены жаргонизмы. Надеюсь, что вы их найдете не слишком много. В конце книги приведен предметный указатель, который, думаю, может быть, вам поможет. Для различных типов реакторов используются разные жаргонные слова (конечно!), и вы увидите, что, хотя книга в основном касается реакторов PWR (водо-водяные реакторы), существуют и другие конструкции. По непонятной причине – особенно для новичков в промышленности – не является необычным, если для оборудования электростанций имеются два или более различных названий, часто взаимозаменяемых, особенно если в разное время они используются по-разному. Например, слово «герметичность» вместо «здания реактора», «система охлаждения реактора» вместо «первичного контура», «топливные стержни» вместо «топливных сборок» и т. д. Я очень старался использовать только одни термины в этой книге. На мой слух и, возможно, на слух других, работавших с PWR, это сделало текст несколько корявым. Я надеюсь, что для кого-то еще это сделало объяснения более ясными. Мой совет читателям книги: не очень-то задерживайтесь на жаргоне. Главное – это обеспечение безопасности реактора, а не то, как что называется.

Еще я хочу выразить благодарность моей жене, Линетте (Lynette), вдохновлявшей меня в ходе написания этой книги и помогавшей мне найти для этого силы и время. Нелегко было бы это сделать, не отложив другие дела. Я также должен поблагодарить первых читателей Николаса Батта (Nicholas Butt) и Кевина Мартина (Kevin Martin), давших мне ряд технических и нетехнических рекомендаций, которые (в основном) были мною приняты. Им было нелегко читать черновики глав, пока не было ясного понимания, как все они согласуются с остальным материалом. Их терпение и упорство были высоко мною оценены.

Я должен выразить огромную благодарность коллективу ядерной электростанции Сайзвелл Б (Sizewell 'B'). Он был моей опорой около 25 лет, пока я работал над вопросами обеспечения ядерной безопасности. Большая часть моего опыта в области PWR связана с Сайзвелл. И я понимаю, что для меня, как автора, существует некий риск: не все PWR одинаковы. Я надеюсь, что проявил достаточную гибкость в описании других PWR (и, разумеется, других конструкций реакторов), чтобы не показаться предвзятым. Сайзвелл имел исключительно открытую атмосферу, в которой я нашел возможность легко задавать вопросы, касающиеся пробелов в моих знаниях. Кроме того, я должен специально упомянуть о поддержке этого проекта со стороны управленческой команды и персонала британской энергетической компании (EDF Energy Corporate). Их энтузиазм с самого начала моей работы, не связанный с ее содержанием, способствовал достижению желаемого результата.

В заключение я должен упомянуть группу по ядерной безопасности в Сайзвелл Б. Их глубина знаний, опыт, готовность к вызовам, упорство и строгость подготовили путь к обеспечению такой безопасности Сайзвелл Б, какая она есть. Их юмор всегда доставлял радость! Эта книга, формально касающаяся управления реакторами, возможно, оказалась близка тем взглядам на мир, каким его видит группа по ядерной безопасности. Думайте что хотите...

Большая часть содержания моей книги – моя собственная. Те точки зрения, которые ярко выражены (а их немного), они тоже мои и не отражают взглядов и политики EDF Energy или любых других компаний. Это, конечно, означает, что любые ошибки, которые вы найдете в этой книге, тоже мои. В этом случае я приношу свои извинения и говорю вам, если вы что-то нашли: «Вы молодец!»

Что касается меня, я нахожу ядерные реакторы очаровательными. И надеюсь, что для вас они станут такими же.

*Колин Таккер (Colin Tucker)*  
Суффолк, Великобритания  
Сентябрь 2019 г.

# 1

## Человек и его собака

Я слышал, как говорили, что современные ядерные реакторы могут работать с помощью одного человека и собаки. Человек при этом служит для кормления, а собака кусает его, если он лезет в систему управления реактором...  
Если бы так.

### **1.1. ЧТЕНИЕ ЭТОЙ КНИГИ НЕ ДАСТ ВАМ НЕОБХОДИМОЙ КВАЛИФИКАЦИИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЯДЕРНЫМ РЕАКТОРОМ**

Задача этой книги состоит в объяснении, как работает ядерный реактор и как он может обеспечивать поставку энергии в электрическую сеть. Эта книга не даст вам необходимой квалификации для управления ядерным реактором. Для этого потребуется несколько лет подготовки, включая сотни часов работы на тренажерах. С другой стороны, она, возможно, даст лучшее понимание того, что входит в понятие управления.

Итак, для начала представим себе, что вы собираетесь проходить вступительные экзамены для работы в главном пульте управления<sup>1</sup> современной атомной станции, подобном показанному на рис. 1.1, и готовы выучить, как это все работает. Ваш инструктор предлагает изменить мощность реактора. И какие у вас идеи, как это сделать?

Или, возможно, компьютерная система индицирует тревогу. Что бы это значило? Какой из четверти миллионов (или около того) элементов оборудования – в зависимости от того, как их считать – ответственен за появление сигнала тревоги? В этом ли проблема? Ваша реакция будет в использовании одного из нескольких сотен индикаторных устройств на главном пульте управления, или надо послать кого-то для осмотра оборудования? Что более важно для оценки происходящего? При этом нужно находиться в готовности выключить установку. В современной электростанции могут быть десятки тысяч возможных причин индикации тревоги, и почти столько же процедур последующих действий.

---

<sup>1</sup> В отечественной промышленности это место называется БЩУ – блочный щит управления. – *Прим. ред.*

При тренировке операторов реакторов вы должны быть способны решить, когда надо действовать быстро, а когда следует лучше разобраться в происходящем. Для всех, кто работает на атомных станциях, безопасность является важнейшим аспектом их деятельности. После безопасности следует думать о людях и оборудовании, но безопасность находится на первом месте. Несмотря на это, следует понимать, что ваша электростанция является фабрикой для производства электроэнергии. Неоправданное ее отключение может оказаться очень дорогим.



Рис. 1.1 ❖ Часть главного пульта управления водо-водяного реактора (PWR)

Я никогда не видел книг (включая эту), которые бы охватывали все, что вам следует знать. Кроме того, у оператора огромное количество переключателей перед руками. Эта книга не даст вам описания работы каждого из них, но она покажет, как компетентный оператор работает в содружестве с пониманием физики работы реакторов и автоматических систем управления их работой.

Итак, что же необходимо, чтобы стать компетентным (и безопасным) сотрудником в области управления ядерными реакторами? Возможно, вам потребуются некоторые научные или инженерные знания, но это не означает

наличия университетского диплома. Например, эти знания могут быть получены в ходе профессионального обучения. Нужно будет много чего выучить о различных вещах, но нет нужды становиться в них экспертом. Придется строго следовать описанным процедурам, но не вслепую – если что-то не кажется правильным, остановите первого встречного и спросите: это так? Нужно обрести способность переходить от покоя к совершению очень быстрых действий и без благодушия, которое свойственно нам, когда все в порядке. А самое главное, вы должны быть способны к общению и работе в команде.

Это все невозможно изучить? Нет. В мире работает свыше 400 атомных электростанций, и на каждой из них множество опытных операторов. Это подобно подготовке экипажей пассажирских самолетов – она требует много времени и денег, но это оправдывается, когда вы садитесь в самолет. Добротность подготовки – самое главное.

## 1.2. ЧТО ВКЛЮЧАЕТ В СЕБЯ ЭТА КНИГА

Эта книга отнюдь не является учебником. В ней рассмотрены некоторые разделы физики, довольно современные. Я люблю физику – но без математики. В обычной жизни для вычислений мы, как правило, используем компьютеры! Для оператора реактора есть несколько идей, которые имеют отношение к вам, а именно: что случилось с реактором, где и почему. В книгу включено свыше сотни графиков и фотографий, которые должны помочь понять более сложные разделы. Дан ряд определений, но я надеюсь, что это не вызовет у вас затруднений. В каждой отрасли промышленности, с которыми я знаком, имеется собственный жаргон, и атомная промышленность не является исключением. В конце книги приведен перечень основных терминов, например, для того чтобы вы могли напомнить себе что-либо при дальнейшем чтении.

Большинство реакторов в мире – предназначены ли они для выработки электроэнергии или обеспечения движения судов и подводных лодок – являются реакторами следующих типов: *реактор с водой под давлением (PWR – Pressurised water reactor)* и подобные им *кипящие водяные реакторы (BWR)*<sup>1</sup>. Это не совсем верно для Великобритании, где большинство реакторов, используемых для генерации электроэнергии, различных типов. Однако в Великобритании с 1990 г. работают одни из самых успешных промышленных PWR типа *Сайзвел В (Sizewell B)* и строятся еще, например *Хинкли Пойнт С (Hinkley Point C)* и реакторы, планируемые для *Сайзвел С (Sizewell C)* и *Брэдвелл В (Bradwell 'B')*. По этим причинам (и благодаря пристрастию автора) эта книга касается в основном работы и конструкции реакторов типа PWR.

Я собираюсь в этой книге объяснить, как работает реактор типа PWR и что заставляет его действовать. Я опишу, как, если вы оператор реактора, можно его запустить, изменить уровень мощности и выключить. Усвоив три главных понятия (см. ниже), вы обнаружите, что все это намного легче, чем можно

<sup>1</sup> В России действуют оба типа реакторов. К PWR относятся реакторы типа ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор). К BWR – реакторы типа РБМК (реактор большой мощности канальный). – Прим. ред.

было предположить. По ходу эта книга познакомит вас с некоторыми этапами истории атомных реакторов и электростанций. Я всегда находил это очень интересным, а также считал, что это поможет легче запомнить некоторые вещи, влияющие на работу реакторов.

Я объясню, как реактор PWR перезагружается топливом и как можно понять, что реактор готов для этого. А также собираюсь рассмотреть несколько возможных аварий, которые могут возникать в реакторах типа PWR, и что вы, как оператор ректора, должны при этом делать. Безопасность превыше всего, помните? Аварии являются большей частью подготовки операторов, хотя и маловероятно их возникновение.

## 1.3. Три основных понятия

Управление реактором не так сложно, как можно подумать, но и не является полностью интуитивным. Я собираюсь предложить три основных понятия для понимания работы PWR:

- реактивность, или как условия внутри реактора влияют на цепную реакцию деления;
- стабильность реактора, т. е. механизм обратной связи, который удерживает стационарный режим его работы;
- стабильность предприятия, т. е. что произойдет, если вы отключите реактор от остального оборудования (и после этого).

Если эта книга поможет вам воспринять эти три понятия, вы с легкостью поймете поведение реактора PWR как при ежедневной работе, так и в более сложных случаях.

## 1.4. И В ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Если вы думали о карьере в атомной промышленности (или начинали работу в этом направлении), я желаю удачи и надеюсь, что вы найдете эту книгу полезной. Если же вы только интересуетесь наукой и техникой или, возможно, живете вблизи ядерного реактора, я верю, что книга окажется для вас занимательной и информативной.

Если хотите почитать об энергетической политике и аргументах за и против атомных электростанций, ищите другие книги. Их множество, касающихся политики относительно атомных электростанций. Аналогично эта книга содержит лишь краткую историю атомных электростанций и значительных аварий, происшедших в промышленности. И опять, существует очень много хороших книг, посвященных этим тематикам. Взамен этого данная книга опирается на факт, что сотни ядерных реакторов уже существуют и успешно вырабатывают электричество. Множество реакторов находятся на этапе конструирования и будут запущены в ближайшие годы. И здесь я не пытаюсь защищать эти реакторы. Я всего лишь стараюсь объяснить, как ими управлять.

# 2

## Физика – это интересно!

Если вы читаете эту книгу, я полагаю, это связано с вашим интересом к науке и технике. Это прекрасно, но проблема состоит в том, что я не знаю уровня вашей подготовки. Если я сочту его слишком низким, то вы можете почувствовать себя оскорбленным таким чтивом, а если слишком высоким, то мои слова не найдут у вас отклика, и вы потеряете интерес.

Предлагаю сделку: я собираюсь начать с некоторых разделов физики, которые, надеюсь, вы хорошо помните из школьного курса. Я буду использовать это для объяснения работы атомного реактора и, начав с этого, опишу, как управляют реактором. Вы вольны пропустить все, с чем уже хорошо знакомы (но это ваш риск).

### 2.1. Атомы и их ядра

Вы, возможно, помните, как вам говорили, что атомы имеют маленькое положительно заряженное ядро в центре и отрицательно заряженные электроны, движущиеся вокруг ядра. Это похоже на движение планет вокруг Солнца. На самом деле все немного сложнее, но для наших целей это достаточно хорошая модель.

В качестве примера на рис. 2.1 показан атом гелия. Гелий – это один из простейших химических элементов.

Гелий в ядре имеет две положительно заряженные частицы (называемые протонами и показанные на рисунке красным цветом) и две отрицательно заряженные (электроны, показанные синим цветом) на периферии атома. Два протона в ядре указывают и физикам, и химикам, что это гелий. Один протон характерен для водорода, три означают, что это литий, четыре у бериллия и т. д. до сотни химических элементов, которые были найдены или получены. Число электронов обычно

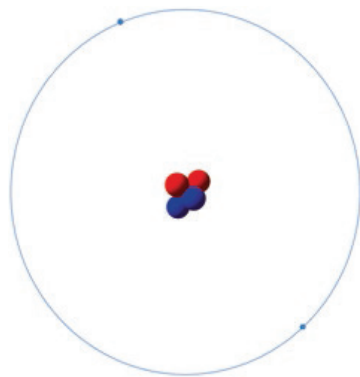


Рис. 2.1 ❖ Атом гелия  
(не в масштабе)

совпадает с числом протонов, при этом число электронов и их расположение определяют химические свойства элемента.

Два протона в ядре нашего гелия заряжены положительно, и можно ожидать, что они будут отталкивать друг друга (одинаковые заряды отталкивают друг друга, помните?). В ядре гелия существуют еще две незаряженные частицы (их называют нейтроны, и они показаны темно-синим цветом), которые способствуют склеиванию ядра. Суммарное число протонов и нейтронов равно  $2 + 2 = 4$ , так что такой гелий называют гелий-4. Существует также гелий только с одним нейтроном в ядре (гелий-3), но он сравнительно редок.

Атомы маленькие. Ну очень маленькие. Вы можете поставить их сто миллионов в ряд, и они растянутся всего на один сантиметр. Но, по сравнению с их ядрами, атомы огромны. На приведенном выше рисунке атома гелия-4 масштаб не соблюден, так как ядро реального атома гелия примерно в 100 000 раз меньше размера всего атома. В этой книге в основном рассматривается, что происходит с ядрами больших атомов, таких как уран. Эта книга о ядерной физике, а не о химии, и поэтому электроны почти не упоминаются. Все рисунки атомов, которые вы увидите в дальнейшем, будут скорее рисунками атомного ядра, а не атома в целом, потому что атомы нас интересуют очень мало. Если я проявляю халатность и называю ядра атомами, прошу меня извинить...

Итак, давайте посмотрим на ядра некоторых элементов. На рис. 2.2 показаны ядра водорода-1, гелия-4, кислорода-16, железа-56 и урана-235.

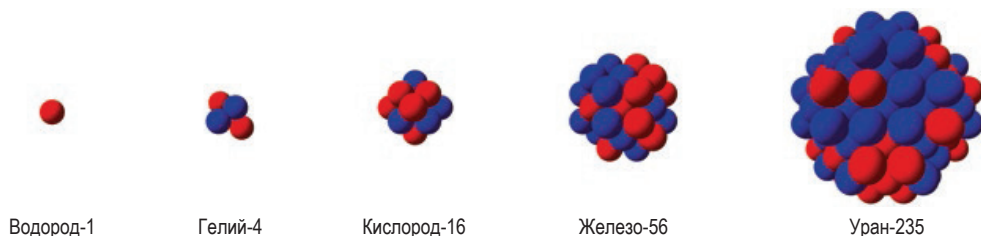


Рис. 2.2 ❖ Ядра некоторых элементов

Ядро атома водорода содержит один протон и ни одного нейтрона. Гелий-4 и кислород-16 имеют по 2 и 8 протонов соответственно, т. е. количество нейтронов в них равно количеству протонов. Железо-56 имеет 26 протонов и 30 нейтронов (немного больше нейтронов по сравнению с протонами). Но когда мы перейдем к урану-235 с 92 протонами, мы обнаружим 143 нейтрона. Это демонстрирует, что чем больше протонов в ядре, тем больше нейтронов требуется для удержания протонов вместе (важность этого аспекта будет рассмотрена в главе 5, где мы поговорим о продуктах радиоактивного распада).

Между прочим, химический символ урана – U, так что в дальнейшем я собираюсь использовать обозначение U-235 вместо урана-235; так легче читать.

## 2.2. РАСПАД

U-235 – несчастливый атом... (Ну хорошо, я имел ввиду ядра, но это не так уж важно, не правда ли?)

Если вы найдете способ добавить в ядро U-235 некоторое количество энергии, оно, возможно, сдастся и расщепится на два меньших ядра. В физике это можно сделать разными путями. Для ядер простейший путь – поразить их другими нейтронами. Выражаясь техническим языком, мы будем называть этот процесс «захват нейтрона». Нейтроны сами по себе не несут много энергии, но они высвобождают ее, когда соединяются с ядрами. Вспомните щелчок, которым сопровождается прилипание магнита к куску железа, и вы поймете идею.

Эта повышенная энергия делает ядра U-235 весьма нестабильными. Чтобы понять это, представим ядро U-235 как большую каплю воды в отсутствии земного притяжения (например, в космосе). Если вы смотрели видеофильмы про это, то могли заметить, что сначала капля из сферической принимает приплюснутую форму, затем растягивается и даже расщепляется на две капли. Если это происходит, две новые капли оказываются вблизи друг от друга. Но с ядрами это не так. Каждое из новых ядер имеет большое число положительно заряженных протонов вместе с нейтронами. С учетом масштабов атомных размеров электроны находятся очень далеко от этих ядер, и их заряды могут не приниматься во внимание. Два маленьких положительно заряженных ядра отталкиваются друг от друга очень сильно, их ускорение способствует достижению огромных скоростей до возможного столкновения с другими атомами и замедления. Их кинетическая энергия затем превращается в тепло. Большая часть энергии при распаде атомов U-235 уносится этими маленькими ядрами.

Этот процесс расщепления называется *делением* и проиллюстрирован на рис. 2.3. Маленькие ядра справа называют *продукты распада*. Если случится так, что нейтроны столкнутся с ядрами U-235 и будут двигаться достаточно медленно, чтобы быть захваченными ими, то весьма вероятно, что произойдет деление. Это очень быстрый процесс – для отдельного атома U-235 он занимает примерно одну миллионную от одной миллионной секунды. Но энергия, высвобождаемая даже от одного акта деления, огромна в атомных

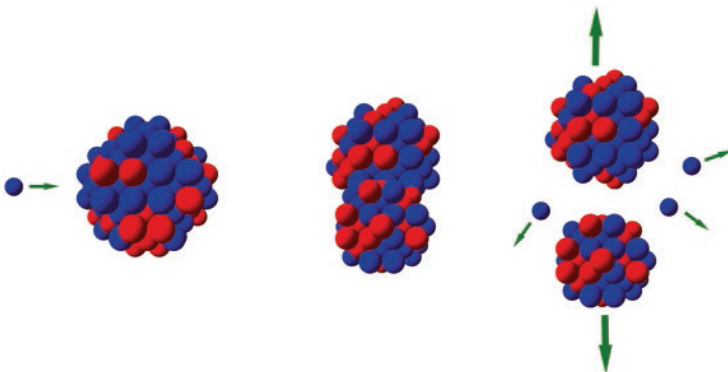


Рис. 2.3 ❖ Распад ядра U-235

масштабах. Она примерно в 2,5 млн раз больше, чем можно произвести от сжигания атома углерода с получением углекислого газа.

Может эта энергия быть полезной, если мы найдем способ сделать события деления ядер более частыми? К счастью, U-235 подходит для этого, потому что при каждом событии деления его ядра образуется два или три дополнительных нейтрона. В теории они могут вызывать деление других ядер, создавая тем самым «цепную реакцию». На практике это немного сложнее.

Большая часть урана в руде не является U-235. Это U-238, в котором в ядре на три нейтрона больше. Намного менее вероятно, что ядра U-238 будут распадаться после захвата нейтронов – они намного стабильнее, чем у U-235. К сожалению, только 0,7 % U-235 содержится в природном уране. Можно увеличить содержание U-235 за счет процесса так называемого *обогащения*, но это дорого, и на выходе обогатительных установок содержание U-235 доводят примерно до 4–5 %<sup>1</sup>. (Если будет достигнута более высокая степень обогащения, возникает скользкий вопрос, не вырабатывается ли сырье для производства ядерного оружия; но не будем об этом.) Таким образом, в вашем топливе оказывается существенная примесь U-238, который не способен к делению, но оказывает воздействие на работу реактора другими путями (как мы увидим в следующих главах).

Возникает удивительный вопрос, так откуда же берется вся эта атомная энергия? Хитрость в следующем: если сложить массы продуктов деления и нейтронов после деления ядер, то их сумма окажется немного меньше, чем масса исходного U-235 плюс масса внешних нейтронов. В ходе процесса деления ядер U-235 происходит преобразование части первоначальной массы топлива в энергию в соответствии со знаменитым уравнением Эйнштейна  $E = mc^2$  (энергия равна произведению массы на квадрат скорости света). Так как  $c^2$  является очень большим числом<sup>2</sup>, потеря массы при ядерной реакции маленькая, в каких единицах ни измеряй. Другое объяснение этого состоит в том, что продукты распада более тесно связаны друг с другом, чем первоначальные ядра U-235, так как они меньше размерами, а силы притяжения больше на более коротких расстояниях. При уплотнении ядра становятся ближе друг к другу, и высвобождается часть свободной энергии<sup>3</sup>. Если вы хотите узнать об этом больше, посмотрите раздел физики «энергия связи».

## 2.3. БЫСТРЫЕ И МЕДЛЕННЫЕ НЕЙТРОНЫ

Нейтроны, высвободившиеся во время и после события распада, движутся со скоростью около десятка тысяч километров в секунду. Физики дали им точное

<sup>1</sup> Считается, что обогащение выше 4–5 % для гражданских энергетических реакторов не требуется. – *Прим. ред.*

<sup>2</sup> Скорость света в вакууме 299 792 458 м/с. – *Прим. ред.*

<sup>3</sup> Силы, препятствующие распаду атомных ядер, являются источником так называемой энергии связи атомных ядер. При распаде ядер тяжелых элементов (например, урана-235) часть этой энергии высвобождается в виде тепла, а масса продуктов распада уменьшается, по сравнению с исходной массой ядер, согласно уравнению Эйнштейна (см., например, «Физика 11 класс. Классический уровень». Мякишев Г. Я., Буховцев Б. Б., Чаругин В. М., Парфентьева Н. А.). – *Прим. перев.*

название «быстрые нейтроны». Это означает, что они с малой вероятностью могут быть захвачены ядрами U-235. Это подобно броску стального шарика мимо магнита с очень большой скоростью; вряд ли он остановится. С другой стороны, если бросить шарик мимо магнита с малой скоростью, магнит его остановит. Чтобы поддержать последующие акты деления, надо сконструировать реактор так, чтобы в нем происходило замедление нейтронов.

Прекрасный способ замедления быстрых нейтронов состоит в пропуске их через материал, отбирающий у них часть энергии (скорости) при каждом соударении с атомами этого материала. После нескольких соударений быстрые нейтроны превращаются в «медленные». Их также называют «тепловые» нейтроны, это связано с тем, что они движутся с такими же скоростями, что и атомы окружающего материала, и физически находятся с ним в состоянии «теплового равновесия».

Физики так и называют процесс уменьшения скорости нейтронов – «замедление», а материал, в котором замедляются нейтроны – «замедлитель». В водо-водяном реакторе (PWR) в качестве замедлителя используется вода. Физики утверждают, что наибольшие потери энергии при каждом столкновении нейтрона с атомом замедлителя достигаются при их одинаковых размерах (массе). Атомы водорода в молекуле воды, которые содержат один протон, делают воду эффективным замедлителем. В других реакторах, действующих в настоящее время в Великобритании, используется графит, материал также со сравнительно легкими атомами. В главе 22 приведен краткий обзор различных конструкций реакторов.

Кстати, одна из частых ошибок, случающихся при обсуждении атомных реакторов, – смешение функций управляющих стержней с функцией замедления нейтронов<sup>1</sup>. Замедлитель является тем узлом, который обеспечивает работу реактора, но не его управление! Эта ошибка каждый раз заставляет меня вздрагивать, когда я об этом слышу, но, возможно, я слишком чувствителен...

## 2.4. ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ

Когда нейтроны, высвободившиеся при расщеплении ядра, замедляются до состояния теплового равновесия, весьма вероятно, что они вызовут новые расщепления других ядер U-235. Однако, как вы помните, уран в обычном реакторе в основном состоит из U-238, который, к сожалению, является очень хорошим поглотителем нейтронов, движущихся со средними скоростями (между высокой и низкой). На практике это означает, что, если вы просто смешаете уран с замедляющим материалом, ничего хорошего не получится. U-238 «украдет» нейтроны до того, как они получат шанс к требуемому замедлению. Для преодоления этой проблемы применяется следующая конструктивная хитрость: физическое разделение замедлителя и топлива. При этом быстрые нейтроны, произведенные в топливе, попадают в замедлитель, а затем отскакивают назад в топливо, побуждая свежие атомы U-235 к новым расщеплениям. Это звучит весьма неправдоподобно, но работает! Это – *цеп-*

<sup>1</sup> Причина в игре слов в английском языке. Moderator – замедлитель нейтронов и moderator – регулятор. – *Прим. ред.*

ная реакция, которая и является источником энергии в атомном реакторе, как показано на рис. 2.4. Процессы, воздействующие на ход цепной реакции, являются ключевыми в физике атомных реакторов.

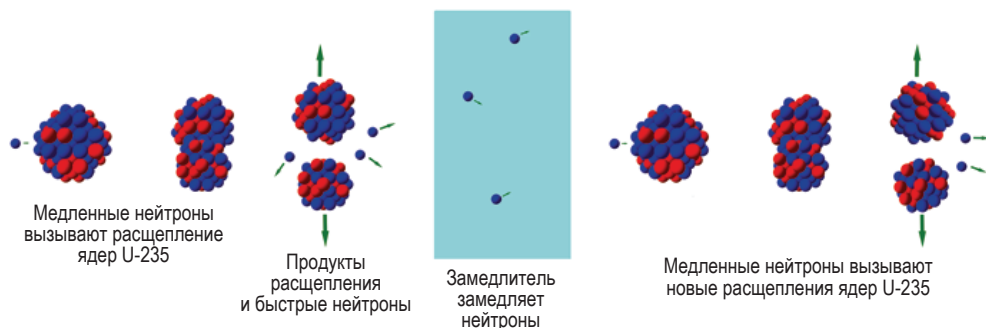


Рис. 2.4 ❖ Цепная реакция расщепления U-235

А что же вызывает беспокойство? Раньше я отмечал, что при каждом распаде атомов U-235 высвобождается два либо три нейтрона (в среднем 2,4 нейтрона, но вы никогда не увидите дробного 0,4 нейтрона<sup>1</sup>). Если происходит цепная реакция и два или три нейтрона производятся при каждом распаде ядра U-235, то что мешает цепной реакции очень быстро нарастать, как лавине? Ответ: потери большей части нейтронов.

Часть нейтронов иногда отражается от замедлителя назад в топливо, до того как они замедлятся надлежащим образом. У них есть хороший шанс быть захваченными атомами U-238 и тем самым оказаться исключенными из процесса цепной реакции. Нейтроны теряются и по другим причинам. Некоторые из них захватываются ядрами водорода-1 в воде, в результате чего образуется водород-2 (дейтерий). Другие захватываются материалами внутренней конструкции реактора, в первую очередь металлами, используемыми, например, в качестве покрытия контейнеров с топливом и управляющих стержней (эти элементы будут обсуждены в следующей главе). И наконец, часть нейтронов просто покидает реактор через его стенки (реактор бесконечных размеров позволил бы избежать этого, но его цена превысила бы любой бюджет).

В правильно сконструированном реакторе распад каждого атома создает достаточно нейтронов для того, чтобы хоть один из них вызвал новый распад. Постоянное число распадов атомов в секунду обеспечивает постоянство энергии, вырабатываемой реактором. Так сколько распадов? Для генерации, положим, 1200 МВт электрической энергии требуется около 3500 МВт тепловой энергии. Большое различие между 3500 и 1200 МВт будет объяснено в главе 10. Для получения 3500 МВт тепла требуется миллион миллионов распадов атомов в секунду. Это море распадов.

<sup>1</sup> Тут автор имеет в виду, что нейтроны не делятся, выпадает при делении иногда два, иногда три, но если усреднить, то получается 2,4. – *Прим. ред.*