

**ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ**

Коллектив авторов Научно-исследовательского института электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова (А.Б. Алексеев, В.А. Беляков, В.А. Глухих и др.). Под редакцией В.А. Глухих и Г.Л. Саксаганского

В 2016 г. издательство Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого опубликовало уникальную монографию «Основы проектирования магнитных термоядерных реакторов» (38,5 условных печатных листов — 613 страниц, тираж 500 экземпляров). В ней сделана попытка систематизировать и обобщить более чем полувековой опыт проектирования и создания в нашей стране — родине токамаков — исследовательских установок управляемого термоядерного синтеза с магнитным удержанием плазмы от первого «полупромышленного» токамака Т-3, на котором удалось впервые осуществить квазистационарную термоядерную реакцию DD-синтеза, до первого экспериментального термоядерного реактора ИТЭР, сооружаемого в настоящее время во Франции.

Речь идёт об опыте, накопленном коллективом НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова в творческом содружестве с учёными и инженерами Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, Троицкого института инновационных и термоядерных исследований, ВНИИ неорганических материалов им. А.А. Бочвара, Института ядерной физики Сибирского отделения РАН, Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Научно-исследовательского и конструкторского института энерготехники им. Н.А. Доллежала, Харьковского физико-технического института, Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, специалистами конструкторских бюро и промышленных предприятий, а также зарубежными коллегами.

Учитывая, что сегодня на повестке дня стоит вопрос о формировании национальной Программы России по промышленному использованию управляемого DT-синтеза и плазменных технологий на период 2019—2025 годов и на перспективу до 2035 г., появление подобной книги энциклопедического типа на русском языке является более чем актуальным прежде всего для молодых инженеров, желающих посвятить себя проблеме освоения нового источника энергии.

Книга полезна как для специалистов, работающих в области управляемого синтеза, так и для работников высшей школы с учетом того, что в ближайшие годы ей предстоит готовить квалифицированный инженерно-физический персонал, который мог бы принять участие в эксплуатации реактора ИТЭР и в развитии национальной Программы России в области управляемого синтеза.

В этом смысле она существенно превосходит единственное издание сходной ориентации — англоязычный перевод книги китайских авторов (Yuntao Song, Weiyue Wu, Shijun Du, et al. Tokamak. Engineering, Mechanics, Springer, 2013, 242 p.).

Книжный рынок по термоядерной тематике демонстрирует своеобразный дисбаланс. Систематически выходят в свет монографии, сборники, учебная литература по физике плазмы, в то время как книжных публикаций по инженерным проблемам УТС и проектированию термоядерных реакторов почти нет. Рассматриваемая книга должна способствовать устранению этого дисбаланса.

Авторы преследовали несколько целей. Во-первых, тезисно описать физические процессы в магнитных термоядерных реакторах (МТР) и налагаемые ими ограничения на конструкцию, параметры и режимы эксплуатации. Во-вторых, помочь читателю, знакомому с основными понятиями технической физики и электроэнергетики, сформировать целостный облик реактора как устойчиво функционирующего комплекса ядерно-энергетических, электромагнитных, механических и информационно-управляющих систем в их взаимодействии. В-третьих, подготовить такого читателя к восприятию непрерывно обновляющейся информации по инженерно-физическим проблемам ядерного синтеза. Не остался в стороне и учебный аспект — подготовка молодых специалистов в области термоядерной энергетики и электрофизического аппаратостроения.

В вышедшей книге 14 тематических глав, посвящённых основным функциональным системам токамаков и в меньшей мере стеллараторам. Каждой главе предпослан краткий анализ инженерно-физической логики проектирования соответствующего оборудования. При этом в общедоступном виде

представлены технические решения международного экспериментального реактора-токамака ИТЭР. Особое внимание уделено обеспечению радиационной безопасности и экологическим аспектам термоядерной энергетики. Авторский коллектив состоит из признанных в научном сообществе специалистов, возглавляемых академиком В.А. Глухих — одним из основателей отечественной инженерной школы в электрофизическом аппаратостроении.

В предисловии к рассматриваемой книге её редакторы отметили, что плазменные установки, включая реактор ИТЭР, — это не только инструменты научного познания и первооснова термоядерной энергетики. Одновременно это гармонизированная совокупность наивысших достижений во многих областях техники. Успешность конкретного плазменного эксперимента и даже научной программы в целом зависит от физико-технической адекватности конструкторских решений и выбранных материалов, качества изготовления и правильности технологических алгоритмов. Отклонение от проектных размеров, искажение конфигурации или пространственной ориентации магнитных катушек, дрейф частот и фазовые сдвиги в системах управления, увеличение потока примесных частиц в плазму из-за неточного исполнения вакуумно-технологических процедур способны стать губительными для плазменного шнура. Такие примеры можно приводить сотнями.

Подобные соображения кое-кто сочтёт тривиальными и с позиций чистой физики будет прав, но при создании крупных установок и, тем более, термоядерного реактора на первый план неизбежно выступают инженерные проблемы. Именно их решению посвящают творческие усилия тысячи специалистов. Для этого же используются основные материальные и финансовые ресурсы.

Глава 1 книги «Инженерно-физические принципы функционирования магнитных термоядерных реакторов» написана академиком РАН В.А. Глухих. В ней излагаются физические основы термоядерной энергетики и приводятся базовые расчётные соотношения между плазменными и техническими параметрами термоядерных установок.

В главе 2 «Системы с магнитным удержанием плазмы» (40 страниц), написанной В.А. Беляковым и А.Б. Минеевым, даётся краткое описание различных созданных и предложенных магнитных термоядерных установок: токамаков, стеллараторов, открытых ловушек, гибридных систем, пинчей и сферомаков. Более подробно рассматриваются токамаки и стеллараторы. Описываются структура и характерные параметры реакторов-токамаков, физико-технические ограничения на выбор их параметров, инженерные требования к основным системам. Оцениваются силовые нагрузки на компоненты токамака и потребность в тритии. При описании стеллараторов приводятся их функциональная схема и важнейшие характеристики. Даётся информация о созданных стеллараторах и проектах термоядерных реакторов-стеллараторов.

Глава 3 «Международный экспериментальный реактор-токамак ИТЭР» (38 страниц) написана В.П. Муратовым, Г.Л. Саксаганским и О.Г. Филатовым. В ней приводятся структура реактора ИТЭР и его характеристики, даётся описание его магнитной системы, вакуумной камеры и внутрикамерных компонентов (панелей первой стенки и энергоприёмных элементов дивертора), теплозащитных экранов и криостата. Рассматривается схема монтажа реактора. В приложении описывается программа обеспечения качества при проектировании реактора.

Глава 4 «Математическое моделирование электромагнитных полей» (66 страниц) написана В.А. Беляковым, Е.А. Ламзиным, С.Е. Сычевским и О.Г. Филатовым. В ней описывается моделирование стационарных и квазистационарных полей, в частности, анализ и синтез стационарных полей, а также рассматривается гофрировка тороидального магнитного поля токамаков, анализируются переходные электромагнитные процессы. Приводятся расчётно-методические основы такого анализа и источники переменных электромагнитных полей. Рассматриваются глобальные вычислительные модели на основе проводящих оболочек и локальные вычислительные модели на основе объёмных элементов. В заключение показано, как осуществляется расчёт потенциалов и интеграция глобальных и локальных моделей. В приложениях приводятся примеры синтеза ферромагнитных вставок и конечно-элементных сеток для реактора ИТЭР.

Автор главы 5 «Сверхпроводящие электромагнитные системы» (55 страниц) С.А. Егоров. В главе содержится обзор сверхпроводящих магнитных систем электрофизических комплексов, приводятся сводные характеристики их сверхпроводников. Относительно подробно описывается магнитная система

реактора ИТЭР. Рассматриваются физико-механические свойства сверхпроводников I и II рода. В этой книге приводятся формулы для расчёта критических характеристик промышленных NbTi- и Nb<sub>3</sub>Sn-стрендов. Рассматривается внутренняя (адиабатическая и динамическая) стабилизация, т.е. сохранение устойчивого сверхпроводящего состояния при воздействии малых возмущений рабочего тока, температуры и магнитного поля.

Глава 6 (автор Г.Л. Саксаганский, 46 страниц) посвящена вакуумно-третиевому комплексу термоядерных реакторов. В ней рассматриваются физические процессы в вакуумной камере реакторатокамака и воздействие плазмы на первую стенку, анализируются источники примесей, управление их содержанием в вакуумной камере, работа магнитного дивертора. Приводится оценка вакуумных параметров, рассматриваются оборудование и технологии вакуумных систем. Описывается математическое моделирование высоковакуумных систем.

В главе 7 «Первая стенка магнитных термоядерных реакторов», написанной И.В. Мазулем и Г.Л. Саксаганским (50 страниц), излагаются принципы проектирования первой стенки вакуумной камеры токамаков — логика её конструирования. Дается оценка инженерно-физических характеристик компонентов первой стенки. Описывается первая стенка реактора ИТЭР. Относительно подробно рассматриваются программа моделирования её компонентов и сооружённые для этой цели испытательные технологические комплексы. Анализируются проблемы, возникающие при переходе к реакторам следующего поколения, и возможные инженерно-физические решения этих проблем.

Глава 8 «Система автоматического управления плазмой» (45 страниц) написана В.А. Беляковым. В ней говорится, в чём суть проектирования системы управления плазмой. Приводятся методические основы проектной разработки. Рассматривается математическое моделирование электромагнитных процессов — построение линейных моделей и нелинейное моделирование, аналитический синтез и оптимизация системы управления, управление начальной стадией разряда и компенсация ошибок магнитного поля.

В главе 9 «Системы нагрева плазмы» (автор А.Б. Минеев, 13 страниц) рассматривается омический нагрев и методы дополнительного нагрева плазмы, в частности, инжекцию быстрых атомов, нагрев плазмы на частотах электронно-циклотронного, ионно-циклотронного и нижнегибридного резонансов.

В главе 10 «Бланкет» (автор И.Р. Кириллов, 39 страниц) рассматриваются основные функции бланкетов и технические требования к ним, алгоритм их проектирования, проекты бланкетов для демонстрационных и коммерческих реакторов (первого поколения и «дальней» перспективы). Описываются испытательные модули бланкета, которые должны быть установлены в реакторе ИТЭР. Приводятся их характеристики. Анализируются проблемы, требующие дополнительных исследований.

В главе 11 «Системы электропитания» (автор А.Г. Рошаль, 40 страниц) рассматривается электропитание обмоток тороидального и полоидального полей (резистивных и сверхпроводящих), включая обмотки центрального соленоида и обмотки управления равновесием плазменного шнура. Описывается система питания обмоток тороидального и полоидального полей реактора ИТЭР. Отдельный раздел посвящён коммутационной аппаратуре.

Глава 12 «Механика магнитных термоядерных реакторов» (51 страница) написана А.Б. Алексеевым. В ней приводятся силовые схемы магнитных систем токамаков (катушек тороидального и полоидального полей, включая центральный соленоид), излагается логика построения и расчёта силовых структур. Дается пример расчёта композитных обмоток, рассматриваются напряжённо-деформированное состояние силовых конструкций токамаков (глобальные и локальные расчётные модели, реакция на внепроектные токовые комбинации в обмотках, аварийные ситуации, термомеханика сверхпроводящих магнитных систем) и магнитно-упругая устойчивость систем тороидального и полоидального полей. Приводится прочностной расчёт вакуумной камеры. Отдельный раздел посвящён особенностям прочностного расчёта стеллараторов.

В главе 13 «Конструкционные и функциональные материалы, критерии выбора и радиационные характеристики» (автор С.А. Фабрицев, 20 страниц) излагаются критерии выбора материалов, приводятся сопоставительные характеристики различных материалов. Особое внимание обращается на материалы, контактирующие с плазмой (сплавы бериллия и вольфрама), и материалы теплоотводящих структур

(высокопрочные медные сплавы). Рассматриваются также материалы вакуумной камеры и опорных структур.

В главе 14 «Безопасность термоядерных реакторов» (автор М.В. Кривошеев, 47 страниц) рассматривается термоядерный реактор как объект обеспечения радиационной безопасности. Излагается идеология безопасного функционирования МТР: вводятся базовые понятия, формулируются принципы обеспечения радиационной безопасности, рассматриваются функции этого обеспечения и проблемы, связанные с радиоактивными отходами и выводом МТР из эксплуатации. Отдельный раздел главы посвящён проектным решениям по обеспечению радиационной безопасности реактора ИТЭР, в частности, принципам проектного обеспечения безопасности этого реактора при нормальной работе и при нештатных режимах эксплуатации. Особо рассматриваются проблемы безопасности, возникающие при проектировании демонстрационных и коммерческих МТР. В приложениях объясняются применяемые определения, приводятся допустимые пределы и критерии, перечисляются рассмотренные при анализе безопасности реактора ИТЭР исходные события, а также вычислительные программы, применяющиеся при анализе безопасности МТР.

*Б.Н. Колбасов*