

# Атомная физика в термоядерных исследованиях

Следующий этап развития термоядерной технологии предъявляет новые требования к исследованиям в области атомной физики

Р.К. Янев

В создании научной и технологической базы термоядерных реакторов участвуют несколько широких научных дисциплин.

Физика плазмы и связанная с ней плазменная технология (включая крупные сверхпроводящие магниты) занимаются проблемами получения и удержания высокотемпературной плазмы, проблемами ее стабильности, нагрева до требуемых термоядерных температур и длительного времени жизни плазмы. Некоторые крупные проблемы, стоящие сейчас перед физикой и технологией термоядерной плазмы, связаны с обеспечением квазинепрерывной работы термоядерных устройств типа токамак благодаря возбуждению ненаводимых токов, с высоким уровнем теплоизоляции в условиях мощного внешнего нагрева плазмы и высоким значением отношения кинематического давления плазмы к магнитному (так называемая бета плазмы).

Термоядерные исследования связаны не только с основными реакциями получения энергии, но и с такими ее аспектами, как термоядерный топливный цикл (ядерная химия) и безопасность термоядерных реакторов.

Материаловедение и технология играют критически важную роль в термоядерных исследованиях, т.к. первая стенка камеры реактора должна выдерживать нагрузки очень высокой мощности (несколько МВт/м<sup>2</sup>), высокие тепловые напряжения, обусловленные тепловыми потоками, и не должна сильно загрязнять плазму примесями элементов с большими атомными номерами, получаемыми в результате взаимодействия плазмы с первой стенкой. Жесткие требования предъявляются не только к материалам первой стенки, но также и к другим компонентам реактора, вступающим в контакт с плазмой, например, к ограничителям, пластинча-

тым мишеням в магнитных диверторах и к антеннам вспомогательного нагрева плазмы.

Атомная физика является также важным компонентом термоядерных исследований. Она используется во многих важных областях, таких как энергетический баланс плазмы, нагрев плазмы, зажигание и контроль за горением плазмы, диагностика плазмы.

Масштабы и сложность ведущихся термоядерных исследований не ограничиваются четырьмя вышеперечисленными научными и технологическими областями, которые в настоящее время являются их наиболее важными компонентами. Кроме того, для проектирования и эксплуатации крупных термоядерных устройств необходима широкая инженерная база, а контроль за экспериментами на таких устройствах нельзя обеспечить без помощи суперкомпьютеров.

Реальным показателем работы термоядерного реактора является термоядерная реактивность ( $\rho_E T$ ). В современных термоядерных экспериментах ученые смогли достичь лишь примерно 1/10 величины  $3 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$  с кэВ, необходимой для реактора. В некоторых экспериментах на самых крупных токамаках (JET, TFTR, JT-60, DIII-D), работающих в настоящее время только на водороде и дейтерии, уже достигнуты реакторные уровни температур ( $T \sim 20\text{--}30$  кэВ), теплоизоляции ( $\rho_E \sim 4 \times 10^{20} \text{ м}^{-3} \text{ с}$ ) и бета плазмы ( $\beta \approx 5\%$ ).

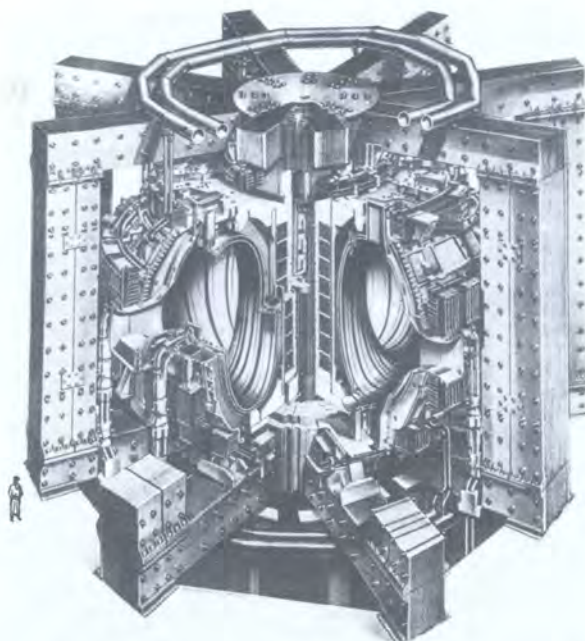
Осуществляемая в настоящее время под эгидой МАГАТЭ деятельность по разработке концепции конструкции термоядерного экспериментального реактора (ITER) основывается на философии, которая должна ликвидировать этот пробел и продемонстрировать возможность зажигания и длительного термоядерного горения плазмы\*.

\*Р.К. Янев — старший сотрудник Отдела физических и химических наук МАГАТЭ.

\*В проекте ITER объединили свои усилия Европейское сообщество, СССР, США и Япония.

**Атомная физика в термоядерных исследованиях и технологии**

Для того, чтобы оценить значение атомной физики для термоядерных исследований, необходимо отметить, что при температурах, соответствующих термоядерному горению (15–20 кэВ), скорость протекания атомных процессов на 8–10 порядков выше скорости термоядерных реакций дейтерий – тритий (D-T). В силу того, что большинство атомных процессов носит эндотермический характер, они начнут поглощать энергию плазмы задолго до начала термоядерной реакции. Даже в чистой D-T плазме тормозное излучение, возникающее при столкновении электронов плазмы с ионами, выделяет количества энергии, превышающие энергию, выделяемую в процессе реакций при температуре ниже ~ 4 кэВ. Механизм охлаждения за счет плазменного излучения уже сам по себе мешает поджигу плазмы при температурах ниже 5 кэВ. Более тяжелые виды атомных ядер, даже если они присутствуют в термоядерной плазме в микроскопических количествах, могут выделять огромные количества энергии (в основном за счет тормозного излучения и излучения на линии). Таким образом, концентрации ионов железа, превышающие 1% плотности плазмы, не дают возможности осуществить поджиг D-T плазмы при любой температуре. Для вольфрама это критическое значение составляет всего лишь 0,1%. Вредное воздействие тяжелых видов атомных ядер, появляющихся в водородной плазме в виде примесей, уже отмечалось на ранних этапах термоядерных исследований. Однако полностью избежать наличия примесей в удерживаемой плазме невозможно из-за ее взаимодействия со стенками камеры реактора. Удержание уровня примесей в плазме в допустимых пределах



Объединенный европейский токамак (JET) – один из действующих в настоящее время токамаков. Данный термоядерный эксперимент проводится под эгидой Европейского сообщества.

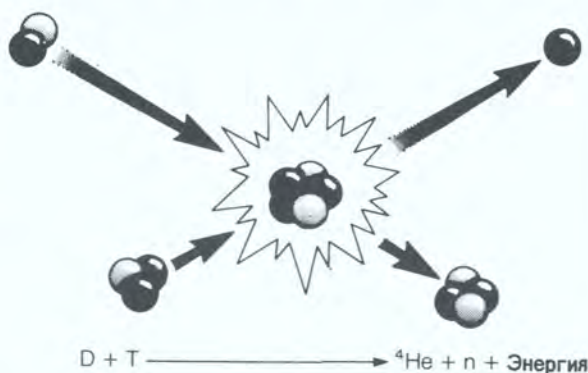
является одной из предпосылок получения высоких температур и зажигания плазмы.

Для того, чтобы максимально уменьшить контакт плазмы со стенкой и помешать проникновению в плазму высоких потоков примесей от стенки на

**Термоядерные исследования**

Перспективы термоядерной реакции основываются на энергии, равной 17,6 МэВ, высвобождаемой в результате термоядерной реакции  $D(T, {}^4\text{He})n$ , а также на запасах дейтерия (D) в природе. Термоядерный реактор благодаря процессу размножения должен сам производить необходимое количество трития (T) в blankets, окружающей камеру реактора, в процессе ядерных реакций  $n({}^6\text{Li}, {}^4\text{He})T$  и  $n({}^7\text{Li}, n, {}^4\text{He})T$ . Литий также достаточно широко распространен в природе. Технические возможности получения термоядерных реакций основываются на удержании высокотемпературной ( $\geq 10^8 \text{ K} \approx 10 \text{ кэВ}$ ) D-T плазмы изолированно от стенок камеры реактора в течение достаточно длительного времени, чтобы произошла термоядерная реакция, масштабы которой позволили бы осуществить зажигание термоядерного топлива. Создание научной и технологической основы для зажигания и управляемости горения термоядерной плазмы являлось основной целью термоядерных исследований на протяжении последних 40 лет. Магнитное удержание высокотемпературной (10–20 кэВ) плазмы низкой плотности ( $\sim 10^{20} \text{ м}^{-3}$ ) является в настоящее время

ведущей концепцией этих исследований и требует тепловой изоляции плазмы в течение одной секунды и более. В рамках этой концепции тороидальная магнитная конфигурация, известная под названием токамак, уже продемонстрировала возможность получения параметров плазмы, близких к реакторным условиям.



границе плазмы необходимо установить вещественный или магнитный ограничитель. В этом случае поток граничной плазмы будет направлен в локализованные области, которые, например, в случае наличия магнитных ограничителей (диверторов) могут находиться даже за пределами камеры реактора. Такой направленный поток граничной плазмы уносит с собой осаждаемые на стенках примеси (а также диффундирующие в сторону стенок частицы плазмы) в специальные места, откуда их можно потом откачать. В дополнение к этой функции двойной защиты диверторы и ограничители оказывают и другие благоприятные эффекты на систему удержания плазмы: они значительно уменьшают тепловые нагрузки первой стенки, осуществляют рециркуляцию изотопов водорода внутри системы и способствуют формированию радиационного охлаждающего слоя на границе плазмы, благодаря которому плазма около стенки остается холодной и, следовательно, не может привести к значительному выделению материалов из стенок камеры.

Оптимизация положительных функций ограничителей и диверторов в огромной степени зависит от поддержания требуемого уровня содержания атомных частиц в граничной плазме, включая состав облицовочных материалов первой стенки, ограничителя и дивертора. Атомная физика, используемая для такой оптимизации, охватывает большое количество разнообразных процессов атомных столкновений газовой фазы и не меньшее количество разнообразных процессов взаимодействия частиц с поверхностью материала. Частицы, участвующие в процессах газовой фазы граничной плазмы, являются основными составляющими плазмы (электроны и ядра изотопов водорода), атомов и ионов примесей от стенки (широкий диапазон заряженных состояний) и молекул, например, водорода, оксидов металлов и углеводородов, присутствующих в этой области вследствие низких температур вблизи стенок (5–50 эВ). Процессы неупругих столкновений этих компонентов плазмы настолько многочисленны и сложны, что для прогнозирования их суммарного воздействия на преобразование энергии плазмы и перенос частиц плазмы требуется огромный объем информации об их столкновительных характеристиках. Однако глобальный эффект этих процессов экспериментально известен: они преобразуют энергию плазмы в излучение и создают таким образом механизм охлаждения, который защищает стенки камеры от высоких тепловых потоков, исходящих из горячего ядра плазмы. Для оптимизации охлаждения граничной плазмы за счет излучения требуется большая база данных по атомным и молекулярным столкновениям и излучательным процессам.

Процессы столкновения компонентов плазмы с поверхностью материалов компонентов, имеющих контакт с плазмой (первая стенка реактора, ограничители, пластинки диверторов и т.д.), оказывают даже более значительное воздействие на свойства граничной плазмы, а, следовательно, и на общие параметры плазмы. Эти процессы могут привести к сильному выделению плазменных примесей и являются прямой или косвенной причиной эрозии первой стенки и других граничных материалов, подверженных воздействию плазмы. Эти процессы носят сложный характер, а имеющаяся о них ин-

формация довольно ограничена (в частности, по материалам, представляющим интерес для термоядерных реакторов).

Множество атомных процессов газовой фазы и на поверхности материалов, происходящих в районе граничной плазмы, оказывают непосредственное влияние не только на энергетический баланс в плазме и на ее удержание, но также и на реакторную технологию. Эти процессы (а также взаимодействие ядер с граничными материалами) приводят к эрозии первой стенки реактора и, следовательно, имеют исключительно важное значение при определении материалов, которые можно использовать в реакторе.

Другой областью, в которой атомная физика вносит важный вклад в развитие термоядерной технологии, является нагрев термоядерной плазмы. Для магнитного удержания плазмы необходима внешняя энергия, которая нагревает ее до термоядерных температур. С помощью омического нагрева плазмы в токамаках ее температуру можно поднять до уровня всего лишь нескольких кэВ, что значительно ниже требуемого уровня. Наиболее эффективным методом передачи энергии плазме от внешних источников в настоящее время является инжекция энергетически нейтральных атомов водорода в плазменный объем. В процессе проникновения в плазму нейтралы ионизируются (при столкновениях с плазменными частицами), а их удержание осуществляется магнитным полем; во время столкновений они отдают свою энергию плазменным электронам и ионам.

Нагрев плазмы во всех крупных современных токамаках осуществляется за счет энергетических нейтральных пучков (в сочетании с высокочастотным волновым нагревом), причем плазме сообщается мощность, равная примерно 20 МВт. Кроме того, с помощью метода инжекции нейтральных пучков в плазму можно сообщать большой импульс, индуцируя в ней таким образом поток ненаводимых токов. Этот поток ненаводимых токов необходим для обеспечения непрерывной работы термоядерных устройств типа токамак.

Метод нагрева плазмы нейтральными пучками почти полностью основан на результатах исследований в области атомной физики. Эффективность данного метода зависит от интенсивности ионов, генерируемых ионным источником, их нейтрализации в газовой ячейке (после ускорения до требуемых энергий), а также от их проникновения и торможения в плазме. Атомная физика играет важную роль на всех этих трех этапах получения и использования пучка: оптимизация ионного источника и нейтрализующей ячейки является технологической проблемой, которую можно решить, только обладая адекватными знаниями процессов атомных столкновений. Изучение процессов передачи энергии пучка плазме также требует наличия подробной информации об ионизации и других процессах взаимодействия пучков атомов с плазменными частицами и примесями. Неполнота баз атомных данных, необходимых для расчета передачи энергии пучка, может привести к сильно неадекватным оценкам требуемых параметров пучка, и, следовательно, требуемой технологии получения пучка.

И в заключение, третьей областью, в которой атомная физика тесно связана с термоядерными исследованиями, является диагностика плазмы.



Многие параметры термоядерной плазмы (температура, плотность, энергия, значение импульса и т.д.), включая их изменения в пространстве и времени, подлежат измерению в целях получения четкой физической картины ее состояния и обеспечения на этой основе возможности управлять ее поведением. Большинство методов диагностики плазмы основывается на эффектах, присущих элементарным (ионным) частицам или возникающих в результате их взаимодействий. С помощью спектроскопических методов, в основе которых лежит изучение тормозного излучения и излучения плазмы на линии примесей, получают большой объем информации об основных параметрах плазмы (температура и плотность электронов и ионов, их пространственное распределение и временное изменение), а также о составе и распределении плазменных примесей. Активные и пассивные методы диагностики с помощью атомных пучков дают возможность получить дополнительную информацию о составе и параметрах плазмы. Кроме того, для использования методов диагностики плазмы необходимо очень точное значение столкновительных и излучательных характеристик плазменных компонентов.

Вышеприведенные примеры иллюстрируют роль, которую исследования в области атомной физики играли и продолжают играть в развитии термоядерной технологии. Несмотря на реальный уровень современных термоядерных устройств, исследования в области атомной физики дают возможность найти вполне удовлетворительные решения тех проблем термоядерных исследований, в которых она играет важную роль (контроль за примесями, технология нагрева плазмы нейтральными пучками, диагностика). Следующий этап развития термоядерной технологии предъявляет новые требования к исследованиям в области атомной физики.

#### **Проблемы атомной физики в развитии технологии термоядерных реакторов**

Одновременно с развитием технологии термоядерных реакторов исследования в области атомной физики, связанные с термоядерными исследованиями, во все возрастающей степени фокусируются на решении технологических аспектов. Специфические формы и проблемы такого участия атомной физики в решении термоядерных проблем, конечно же, будут меняться по мере развития термоядерной технологии. Поэтому целесообразно проанализировать роль атомной физики в развитии технологии термоядерных реакторов в контексте конструкции следующего поколения термоядерных устройств, таких как, например, ITER. Физика термоядерного горения плазмы, полное понимание которого также включено в программу разработки следующего поколения термоядерных реакторов, также ставит определенные проблемы перед исследователями в области атомной физики. Аналогичная ситуация сложилась и в области управления термоядерным горением плазмы.

Одной из крупных проблем, связанных с конструкцией следующего поколения термоядерных экспериментальных реакторов, является выбор адекватных материалов первой стенки. Эта проблема имеет два аспекта: один из них связан с

теплофизическими свойствами первой стенки (металлургическая стабильность, теплоперенос, радиационные повреждения), а второй – с граничными условиями плазмы и контролем за примесями. Как уже говорилось выше, граничные условия плазмы определяются газовой фазой и атомными столкновениями на поверхности, оказывающими сильное влияние на энергетические характеристики плазмы, на время и стабильность удержания энергии, а также на работу диверторов. Следовательно, контроль за граничными условиями плазмы очень важен для успешной работы термоядерного реактора. Граничные условия плазмы – это ключ к получению основной взаимодействующей плазмы. Благодаря наличию сильной корреляции между центральной и граничными частями плазмы, изменения в граничных условиях быстро передаются в ядро горящей плазмы. Таким образом, контроль за граничными условиями плазмы – это путь к управлению процессом термоядерного горения плазмы.

Для успешного контроля за граничными условиями плазмы необходима обширная база данных об атомных процессах газовой фазы и на поверхности. В настоящее время имеется довольно скудная база таких данных, для адекватного пополнения которой требуются значительные научно-исследовательские усилия. В настоящее время многие физики, занимающиеся атомными и поверхностными процессами, принимают участие в создании необходимой базы данных.

Граничные плазменные процессы не только влияют на зажигание и термоядерное горение плазмы, но также определяют скорость эрозии материалов, имеющих контакт с плазмой, а следовательно, влияют и на срок их службы. Кроме того, технология первой стенки реактора должна обеспечивать решение проблемы быстрой эрозии, обусловленной процессами взаимодействия плазмы со стенкой.

Другой специфический аспект проблемы контроля за граничными условиями плазмы заключается в откатке термоядерной „золы”. Альфа-частицы с энергией 3,5 МэВ, генерируемые во время D-T термоядерных реакций, играют важную роль в обеспечении плазмы энергией после зажигания для поддержания процесса горения. Наличие в плазме „холодных” альфа-частиц после термализации приводит к разбавлению термоядерного топлива, поэтому их необходимо непрерывно удалять из зоны реакции.

К счастью, эти альфа-частицы диффундируют в сторону плазменных границ, где их можно направить вместе с другими примесями от стенок в отдельную диверторную камеру и откатать из системы. Атомные процессы взаимодействия термоядерных альфа-частиц с другими компонентами плазмы (в частности, с примесными ионами) могут оказать сильное влияние на их термализацию в зоне реакции и их удаление из основной камеры реактора. И снова для прогнозирования и контроля за образованием гелиевой „золы” необходима крупная база атомных данных.

Для проектирования и развития технологии магнитных диверторов требуются особенно большие объемы данных об атомных взаимодействиях и взаимодействии плазмы с поверхностью. Плитки диверторов должны выдерживать тепловые потоки и потоки плазменных частиц, которые в несколь-

ко раз выше потоков на первую стенку камеры реактора. Несовершенная конструкция плиток и камеры дивертора может привести к сильной эрозии материала. В дополнение к правильной конструкции дивертора должна обеспечивать рабочий режим с интенсивной рециркуляцией водорода между плитками и плазмой с целью получения холодной, высокоплотной плазмы около пластин дивертора. В этом случае резко уменьшаются тепловые нагрузки и нагрузки потока частиц на плитки дивертора, а также скорость эрозии. Для поддержания высокого режима рециркуляции вокруг пластин скорость откачки из камеры дивертора должна быть чрезвычайно высокой. В переносе энергии и передаче импульса нейтральным газом (накопленным в камере дивертора благодаря процессу рециркуляции и имеющим плотность, в несколько раз превышающую плотность плазмы) участвует необычайно широкий диапазон атомных и поверхностных процессов, данные о которых необходимы для прогнозирования эффектов этого переноса.

Другой важной областью развития технологии термоядерных реакторов является нагрев плазмы. Существующая концепция ITER предусматривает нагрев плазмы в активной зоне реактора с помощью мощных пучков дейтерия с энергией порядка 1 МэВ. Как уже говорилось выше, требуемая энергия пучка определяется необходимыми уровнями передачи энергии в плазму и возбуждения наводимых токов, обеспечивающих передачу импульса. При таких высоких энергиях ослабление пучка зависит от более широкого спектра процессов столкновения (включая возбужденные атомы пучка), чем в случае нейтральных пучков с энергией 100–200 кэВ, которые используются в настоящее время в крупных токамаках. Эффекты возбуждения атомов пучка могут привести к удвоению сечения торможения пучка и, тем самым, обусловить новые требования, предъявляемые к технологическим нейтральным пучкам. Получение интенсивных нейтральных пучков в диапазоне энергий, равных нескольким МэВ, должно основываться на использовании источников отрицательных ионов, эффективность которых пока еще недостаточна. И вновь физика источников отрицательных ионов определяется атомными, молекулярными и поверхностными столкновениями, а их технологическое усовершенствование требует наличия обширной базы данных.

#### **Программа МАГАТЭ в области атомной физики, связанная с термоядерными исследованиями**

В дополнение к усилиям по созданию рамок международного сотрудничества в области термоядерных исследований (например, семинар INTOR и деятельность по разработке концептуальной конструкции ITER), а также к усилиям по организации Международной конференции по физике плазмы и управляемым термоядерным реакциям, которая проводится раз в два года, МАГАТЭ осуществляет свою собственную программу исследований в области физики плазмы, ядерной физики, атомной и молекулярной физики, а также в области термоядерной технологии и техники, связанную с термо-

ядерными исследованиями. Кроме того, Агентство публикует международный журнал *Nuclear Fusion, the World survey of activities in controlled fusion research* (первое издание которого появилось в 1986 г., а второе находится в стадии подготовки) и другие публикации, являющиеся результатами научных совещаний и симпозиумов, организуемых Агентством в области термоядерных исследований. Цель этой научной программы МАГАТЭ заключается в организации форума специалистов для обсуждения новейших современных и текущих проблем в различных областях термоядерных исследований и технологии. Кроме того, с помощью исследовательских контрактов и стипендий Агентство оказывает прямую помощь государственным членам в реализации своих национальных программ термоядерных исследований. В роли консультативного органа программ МАГАТЭ в области термоядерных исследований выступает Международный совет по термоядерным исследованиям (IFRC).

Программа Агентства в области аспектов атомной физики, связанных с термоядерными исследованиями, была начата в 1976 г. после создания программы по сбору атомных и молекулярных (А/М) данных термоядерных исследований в рамках Секции ядерных данных Отдела физических и химических наук МАГАТЭ; реализация данной программы осуществлялась под руководством подкомитета IFRC по А/М данным для термоядерных исследований. Первоначальное направление данной программы Агентства было определено на совещании консультативной группы, которое состоялось в Кулхаме, Великобритания, в 1976 г. и было специально организовано для идентификации ближайших и перспективных потребностей в А/М данных для термоядерных исследований. В настоящее время главными целями деятельности МАГАТЭ в области А/М данных являются:

- создание и поддержка международной базы данных, содержащей оцененные А/М данные, рекомендуемые для термоядерных исследований
- координация и поддержка развития международной базы А/М данных для термоядерных исследований (в частности, с помощью координации деятельности по компиляции и оценке, осуществляемой в национальных центрах А/М данных для термоядерных исследований)
- создание, поддержка и опубликование библиографических баз данных для термоядерных исследований
- оказание содействия и поддержки в получении А/М данных для термоядерных исследований с помощью исследовательских контрактов МАГАТЭ, программ координированных исследований и других соответствующих связей в рамках атомно-физического сообщества
- распространение оцененных А/М данных между термоядерными лабораториями и другими пользователями.

МАГАТЭ стремится к достижению этих целей в тесном сотрудничестве с сетью международных

центров по атомным данным и благодаря широкому участию значительной части атомно-физического и термоядерного сообщества.

Значительный прогресс был достигнут в области создания базы оцененных А/М данных для термоядерных исследований, которая в настоящее время содержит рекомендованные данные для всех процессов столкновений основных компонентов водородной плазмы. Кроме того, существуют полные или почти полные наборы данных о столкновительных и излучательных процессах с участием наиболее важных плазменных примесей (углерод, кислород, железо), а в случае ионизирующих процессов – для всех атомов и ионов, представляющих интерес с точки зрения термоядерных исследований. Формат этих данных позволяет легко их использовать в прикладных компьютерных программах для термоядерных исследований. Компиляция и оценка данных осуществляется координированным образом с помощью сети центров А/М данных, а оценка их пригодности и разработка рекомендаций – группой международных экспертов. В настоящее время база атомных данных МАГАТЭ для термоядерных исследований расширяется в области данных по взаимодействию плазмы со стенкой. На данном этапе в программу включены только самые главные процессы взаимодействия частиц с поверхностью. Однако ожидается, что рам-

ки этой работы будут расширены и охватят данные о более сложных явлениях, возникающих во время взаимодействия плазмы с материалами, включая свойства материалов, подвергающихся воздействию высоких тепловых потоков и интенсивных потоков частиц.

В настоящее время программа МАГАТЭ в области атомной физики, связанная с термоядерными исследованиями, сконцентрирована на завершении компиляции базы А/М данных, необходимых для моделирования и диагностики граничных условий плазмы в крупных токамаках, переноса и излучения примесей со средними и высокими атомными номерами, проникновения энергетических (1–2 МэВ) нейтральных дейтериевых пучков в термоядерную плазму, а также на создании базы данных по основным процессам взаимодействия частиц с поверхностью. Эта программа объединяет в себе усилия персонала Секции ядерных данных МАГАТЭ и сети центров по А/М данным, а также многих национальных научно-исследовательских лабораторий по атомной физике и поверхностной физике. Этот дух международного сотрудничества по-прежнему играет конструктивную роль в создании международной базы рекомендованных атомных и молекулярных данных, а также данных по взаимодействию плазмы со стенкой, которые используются в термоядерных исследованиях.

