

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

Пыль в установках управляемого термоядерного синтеза

В.Н. Цытович, Дж. Винтер

Обсуждается актуальная проблема пыли в пристеночной плазме в установках управляемого термоядерного синтеза. Показано, что физические условия в области пристеночной плазмы в SOL (Scrape Off Layer) и в диверторе близки к тем, которые часто встречаются в низкотемпературной плазме в установках по плазменному траплению и плазменной обработке поверхностей, где образование пылевых частиц является распространенным явлением. Из-за отсутствия данных по непосредственному детектированию пылинок непосредственно в объеме плазмы существующих термоядерных установок (ТУ) анализируются косвенные данные, позволяющие оценить роль пыли в ТУ. Экспериментальные данные о структуре пылевых частиц, собранных после разрядов в ТУ, указывают на то, что в течение разрядов пылевые частицы удерживались долгое время внутри пристеночной плазмы. Проблема пыли в ТУ становится намного серьезнее при том увеличении мощности потоков энергии на стенки и продолжительности работы ТУ, которое предполагается в будущих установках, таких, как ИТЕР.

PACS numbers: 28.52.-s, 52.40.Hf, 52.55.-s, 81.90.+s

Содержание

1. Введение (899).
2. Современное состояние проблемы (900).
3. Проблемы, ожидающие решения (904).
4. Агломерация пыли (905).
5. Эксперименты по анализу пылевых частиц в установках управляемого термоядерного синтеза (906).
6. Заключение (907).

Список литературы (907).

1. Введение

Пылевыми частицами в физике плазмы принято называть небольшие твердые макрочастицы, тем или иным путем попавшие в плазму или образовавшиеся в ней. Характерным размером для плазмы является дебаевский радиус, на котором экранируется поле любого заряда. Размеры пылевых частиц могут быть как меньше дебаевского радиуса экранирования, так и больше его, но чаще всего они меньше дебаевского радиуса, и это мы будем иметь в виду в дальнейшем.

В.Н. Цытович. Институт общей физики РАН,
117942 Москва, ул. Вавилова 38, Россия

Тел. (095) 135-02-47. Факс (095) 135-02-70

E-mail: tsyt@ewm.gpi.ru; tsytov@td.lpi.ac.ru

Дж. Винтер (J. Winter). Institut für Experimentalphysik II
(Anwendungsorientierte Plasmaphysik)

Ruhr-Universität Bochum, D-44780, Bochum and Institut
für Plasmaphysik, Julich GmgH, IPP, 52425, Julich, Germany
Tel. + 49 (0) 234 700 3800/3693. Fax + 49 (0) 234 7094 171
E-mail: jw@plasma.ep2.ruhr-uni-bochum.de

Статья поступила 5 января 1998 г.

Любое твердое тело, помещенное в плазму, быстро приобретает большой отрицательный заряд, так как тепловые скорости электронов намного превосходят тепловые скорости ионов. Пылевые частицы в плазме, как правило, имеют большие заряды (порядка или больше 10^4 заряда электрона), и даже их небольшая концентрация может оказаться на электростатическом балансе, а их вклад в локальную квазинейтральность может быть существенным. Кроме того, они вносят сильную диссипативность в плазму, так как плазма рекомбинирует на их поверхности.

На первый взгляд пылевые частицы существовать долго в плазме не могут из-за ее большой температуры. В общем виде такое утверждение ошибочно. Многочисленные эксперименты показывают, что при относительно низких температурах плазмы (см. ниже) пылевые частицы могут не только сохраняться в плазме, но и образовываться и непрерывно расти в размерах. Еще Лэнгмюром в его первых экспериментах с низкотемпературной плазмой отмечалось наличие в ней большого числа пылевых частиц. Особое значение имеет то, что низкотемпературная плазма чаще всего контактирует со стенками, с которых в плазму инжектируется не только нейтральная газовая компонента, но и макрочастицы. Последнее связано как со сложной структурой поверхностей стенок, так и с неравномерностью плазменных потоков на стенку. Исследования взаимодействия плазмы со стенками, которые в последние годы развивались весьма интенсивно, показали, что практически любые контакты плазмы со стенками приводят в той или иной мере к инъекции в плазму пылевых частиц. Если даже пылевые частицы гибнут внутри плазменного объема, то обычно устанавливается баланс между инъекцией частиц и их гибеллю, так что концентрация пылевых частиц в пристеночной плазме устанавливается на опре-

деленном уровне. Сейчас уже ясно, что большинство низкотемпературных плазменных экспериментов имеет дело с плазмой, в которой пылевая компонента играет весьма значительную роль.

Наиболее разработаны (экспериментально, численно и теоретически) представления о пылевых частицах в плазме, когда их размеры меньше лебаевского радиуса. В последующих оценках мы будем это использовать.

2. Современное состояние проблемы

В исследованиях по проблеме управляемого термоядерного синтеза (УТС) за последнее время существенно изменились акценты.

Удивительный прогресс достигнут в получении плазмы с параметрами, близкими к поджигу управляемой термоядерной реакции в лабораторных условиях. Достигнутая температура плазмы в ряде установок на порядок превосходит температуру в центре Солнца, а плотность плазмы и время удержания энергии близки к тем, которые соответствуют положительному энергетическому балансу термоядерных реакций. Поэтому в настоящее время исследования по УТС все больше смещаются к проблеме взаимодействия мощных энергетических потоков, которые планируется создавать в будущих термоядерных установках (ТУ), со стенками, т.е. к "проблеме первой стенки", где мощные потоки впервые взаимодействуют с материалами стенок. Одной из главных задач в ТУ остается проблема контроля взаимодействия плазмы с поверхностью в условиях больших потоков энергии на стенки, что будет одной из характерных черт ТУ с положительным выходом. Существенными здесь являются различные аспекты материала-ловедения. Но очевидно также, что эти проблемы пересекаются с проблемами контроля пристеночной плазмы. Как будет показано ниже, в этой связи должны быть тщательно рассмотрены и новые физические явления, а именно взаимодействия пристеночной плазмы с макро-частицами (пылью), которые могут образовать плазменно-пылевой слой. Тогда плазменные потоки будут взаимодействовать не непосредственно со стенками, а будут видоизменяться этим плазменно-пылевым слоем. Вероятно, что образование такого плазменно-пылевого слоя в пограничной плазме может оказаться существенным для удержания плазмы в целом при больших временах и больших потоках в будущих ТУ.

В настоящей статье мы обсудим косвенные экспериментальные свидетельства наличия такого плазменно-пылевого слоя в пристеночной плазме современных ТУ.

Прежде всего следует объяснить, почему пылевые частицы могут образовываться в пристеночной плазме и каков механизм их удержания в плазменном объеме.

Так как современная термоядерная программа в основном связана с магнитным удержанием плазмы в токамаках, мы обсудим механизмы появления пылевых частиц в этих установках.

Нужно заметить, что в центральной части ТУ малые твердые частицы не могут сохраняться и быстро испаряются. В ТУ широко используется метод увеличения плотности плазмы путем инъекции твердых крупинок в горячую центральную часть плазменного объема. Хотя такие крупинки по размеру намного больше тех частиц, которые мы условились называть пылевыми, они испаряются очень быстро, не доходя до центральной части

плазмы. Физические механизмы испарения крупинок и пылевых частиц различны, но и те, и другие не могут сохраняться в центральной части ТУ.

Горячая плазма токамаков существует вплоть до последней замкнутой магнитной поверхности. Эту часть плазмы называют областью удержания. Хотя на краю области удержания температура плазмы значительно ниже, чем в центре, она все еще высока для того, чтобы макро-частицы могли сохраняться достаточно долго. Обычно пылевые частицы могут сохраняться долгое время в плазме с температурой ниже примерно 20 эВ. Но существуют области за последней замкнутой магнитной поверхностью, где температура плазмы существенно ниже этого значения. Область за последней магнитной поверхностью называют SOL (или *Scrape Off Layer*: английское слово *scrape* означает сгребать); плазма в этой области как бы сгребается либо к стенкам камеры, либо к диафрагмам (*limiters*), либо в дивертор. Наблюдения показывают, что в SOL обычно имеется интенсивная турбулентность, диффузия является быстрой, а градиенты температуры — большими. Близко к стенкам температура плазмы составляет всего нескольких электронвольт, и пыль может легко сохраняться в этих условиях. Ниже мы дадим экспериментальное подтверждение того, что в этих областях пыль существует внутри плазмы, но не на поверхности стенок. Это подтверждение косвенное, так как получено путем анализа пылинок, собранных после разряда. Но обнаруженное распределение пылевых частиц по размерам, форме и составу свидетельствует о том, что в течение разряда они удерживались внутри низкотемпературной части пристеночной плазмы и подвергались воздействию низкотемпературной плазмы в течение всего разряда.

В этой связи необходимо заметить, что будущие ТУ должны работать в непрерывном режиме, тогда как современные ТУ работают только в течение десятков секунд. При планировании будущих ТУ были сделаны две существенные экстраполяции (с необходимыми поправками) по сравнению с существующими ТУ: предполагается, что время удержания и энергетические потери будут следовать тому же эмпирическому закону, который справедлив для современных ТУ, хотя потоки энергии на стенки будут значительно большими, и предполагается, что эмпирические законы сохранятся для значительно больших времен удержания. Но можно ожидать, что чем дольше разряд и чем мощнее потоки энергии на стенки, тем больше будет сказываться присутствие пыли в пристеночной плазме. Свидетельством правильности этого утверждения является большинство экспериментов по плазменному травлению и плазменной обработке поверхностей.

Поэтому мы хотим сравнить параметры плазмы в этих установках с параметрами пристеночной плазмы в ТУ.

Стенки могут испарять и инжектировать в плазму не только нейтральные частицы (газ), но и некоторые твердые частицы, что можно рассматривать как инъекцию пылевых частиц. Величина потока пылевых частиц со стенок, очевидно, зависит от потока тепла на стенки. Это подтверждается также совокупностью знаний, полученных из экспериментов по плазменному травлению.

В установках по плазменному травлению параметры плазмы близки к тем, которые имеют место в пристеночной плазме ТУ. Плотность плазмы не столь высока, как в

токамаках (около $10^9 - 10^{10} \text{ см}^{-3}$), но электронная температура весьма близка (между 2 эВ и 5 эВ), причем операционное время достаточно большое (часы и дни), поэтому можно представить возможный реально ожидаемый эффект при длительной работе ТУ. В экспериментах по травлению ионизации в объеме плазмы чаще всего производится внешним источником таким, как высокочастотное поле. В этих экспериментах стандартными являются генерация потоков пылевых частиц со стенок и непрерывный рост пылевых частиц в размерах внутри плазменного объема. Обычно продукты травления инжектируются в плазменный объем и начинают образовывать пылевые частицы с большим электрическим зарядом (для размера пылевых частиц порядка 1 мкм типичными являются значения заряда пылинки $Z_d \sim 10^4 - 10^5$, где Z_d измеряется в единицах электронного заряда). Благодаря наличию большого заряда у пылевых частиц потенциальный барьер для них велик. Так, для потенциала в 3 В пылевые частицы будут иметь потенциальный барьер в $3 \times Z_d$ В (примерно 30–300 кВ для $Z_d \sim 10^4 - 10^5$). Так как пылевые частицы имеют весьма малые кинетические энергии, то они обычно находятся внутри плазменного объема, левитируя в постоянном электрическом поле пристеночного двойного слоя.

Эксперименты с плазменным травлением показывают, что пылевые частицы непрерывно растут в размере и при этом удерживаются в плазменном объеме. Имеются два механизма формирования пылевых частиц: 1) инжекция пылевых частиц со стенок; 2) конденсация вещества из перенасыщенного пара сложных молекул и молекулярных кластеров. Второй механизм начинается с образования сложных молекул и кластеров, и в результате последовательных ионно-молекулярных реакций формируются пылинки. Последние обзоры по формированию пыли в экспериментах по плазменному травлению см. в [1–3].

Измерения параметров пристеночной плазмы в SOL ТУ показывают, что там имеются весьма сходные условия. Температура электронов пристеночной плазмы дивертора, отделенной от дивертора излучением (в зарубежной литературе используется термин *detached divertor plasma*, т.е. плазма, не соприкасающаяся с дивертором), может быть весьма низкой, вплоть до 1 эВ [4], хотя плотность здесь относительно большая — порядка $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Ионные потоки в плазме, не соприкасающейся с дивертором, очень большие ($2 \times 10^{20} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$) и создают сильное распыление поверхностей стенок.

В плазме, отделенной от диафрагм излучением (*detached limiter plasma*), электронная плотность ниже, $n_e \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$, а температура несколько выше, а именно $T_e \leq 5$ эВ. В таких условиях пылевые частицы вполне могут сохраняться и расти. Более того, во многих существующих установках используются углеродные материалы с низкими значениями атомных номеров Z для покрытия деталей поверхностей стенок установок, а также диафрагм и диверторов, которые подвержены действию больших тепловых потоков. Эрозия этих поверхностей довольно высока: эрозийный выход из-за распыления оказывается порядка 10^{-3} , выход благодаря химической эрозии для графитовой защиты составляет 2×10^{-2} , что приводит к формированию углеродных и других летучих молекул, поступающих в пристеночную плазму. Оптическими методами наблю-

далось формирование в пристеночной плазме комплексов C_yH_x вплоть до $y = 30$. Выше уже отмечалось, что в установках по плазменному травлению образование молекулярных комплексов предшествует образованию пылевых частиц. Измерения [5] показывают, что комплексы вплоть до $C_{30}H_x$ образуются при покрытии пленками поверхностей ТУ, что также способствует образованию пылинок после испарения материала поверхностей. Все это указывает на то, что механизмы образования пылевых частиц в ТУ аналогичны механизмам образования пыли в начальной стадии плазменного травления. В настоящее время длительность травления намного превосходит длительность разряда в ТУ, но в будущих, более длительных разрядах в ТУ эти процессы должны быть совсем одинаковыми.

Для пристеночной плазмы, не соприкасающейся с дивертором, о которой шла речь выше, поток CH_4 от стенок составляет $3 \times 10^{18} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а вблизи стенки отношение плотности n_{CH_4} к электронной плотности n_e составляет 5 %.

Необходимо заметить, что современная техника обработки поверхностей, применяемая в ТУ, использует покрытие поверхностей углеродом, бором и кремнием (карбонизация, боронизация и силиконизация поверхностей) [5]. Одним из следствий использования такой технологии покрытия поверхностей является то, что взаимодействие плазмы с поверхностью в ТУ становится почти таким же, как и в установках по плазменному травлению и плазменной обработке поверхностей, где тоже используются такие материалы, как углерод и кремний, и где наблюдается, как правило (а более точно — почти неизбежно), образование пылевых частиц. Можно заключить, что непрерывное формирование и рост пылевых частиц в ТУ с использованием карбонизации и боронизации поверхностей стенок вполне вероятны, и оба механизма образования пылинок, упомянутые в связи с экспериментами по плазменному травлению, могут эффективно работать.

Недавние косвенные экспериментальные доказательства наличия пыли в плазме внутри ТУ при ее работе описаны ниже.

Существенным различием между пристеночной плазмой ТУ и плазмой при плазменном травлении является наличие высокого уровня турбулентности в пристеночной плазме ТУ. Это обстоятельство может привести к серьезному увеличению образования пыли в ТУ по сравнению с установками плазменного травления. Как и в установках плазменного травления, в ТУ взаимодействие плазмы со стенками приводит не только к испарению нейтральных атомов, но и к инжекции небольших кусков материала стенки в объем плазмы, т.е. к инжекции пыли. Этот процесс может быть более эффективным в ТУ благодаря неустойчивостям потока плазмы вблизи стенки. Хорошо известно, что при возбуждении пилообразных колебаний или локализованных поверхностных мод в диверторных устройствах наблюдаются большие периодические изменения мощности теплового потока. Материалы подвергаются большой и неравномерной термической нагрузке, и это может привести к мелкомасштабным поверхностным разрушениям, т.е. к инжекции крупинок (пыли). Процесс усиливается на отдельных участках за счет разрыхления поверхности водородом. Поэтому неустойчивости в пристеночной

плазме ТУ могут увеличить поток инжектируемых пылевых частиц.

В существующих токамаках очень большая нагрузка на стенки возникает в течение неустойчивостей срыва. При этом часто по оптическим следам можно видеть появление пылевых частиц (но только самые большие пылевые частицы могут наблюдаваться таким путем). Это явление получило даже особое название — НЛО (неопознанные летающие объекты), хотя сейчас установлено, что это большие пылевые частицы. Распределение по размерам пылевых частиц, образующихся при неустойчивостях срыва, фактически неизвестно, так как только самые большие частицы детектируются как НЛО в ТУ, и наиболее вероятно, что при неустойчивостях срыва генерируется значительно большее число пылевых частиц меньшего размера.

Следует заметить, что пылевые частицы, возникающие при развитии неустойчивостей срыва, аккумулируются от различных срывов и от одного разряда к другому. Когда начинается очередной разряд, пылевые частицы, созданные в предыдущих разрядах, вновь инжектируются в объем плазмы и левитируют вблизи стенок.

После работы ТУ пылевые частицы обычно находят в нижней части ТУ. Поэтому вопрос состоит не в том, имеются они или нет при разряде в ТУ, а в том, находится большинство из них в течение разряда внутри пристеночной плазмы или сидит на стенках. Если они удерживаются в плазме, то не только могут влиять на полный перенос тепла или генерировать поток примесей, но и могут играть важную роль в общей концепции взаимодействия плазмы со стенками и энергетическом выходе ТУ. По количеству пыли, находимой после разрядов в современных ТУ, можно дать оценку предполагаемого количества пыли, которое будет производиться будущими ТУ такими, как ИТЕР. Это будет около 1 т пыли в год. Пыль в ИТЕРе будет радиоактивной, аккумулируя радиоактивный тритий. В этой связи возникает много проблем радиационной безопасности при работе ИТЕРа, которые необходимо как-то решить [6].

Кратко рассмотрим физику появления заряда у пылевых частиц и их взаимодействие со стенками. Образующиеся пылевые частицы весьма быстро заряжаются до больших отрицательных зарядов, если зарядка частиц происходит плазменными токами, направленными на пылинки. Частицы могут зарядиться положительно, если потеря электронов из-за облучения ультрафиолетовым излучением в разряде превысит электронный ток зарядки. Заряд на пылевых частицах при зарядке пылинок плазменными токами в основном определяется электронной температурой и размерами пылинок. Поверхностный потенциал пылевых частиц на численный множитель порядка единицы отличается от электронной температуры (в энергетических единицах). Этот потенциал известен как плавающий потенциал, и он соответствует равенству нулю токов на пылевую частицу. Пылевая частица микронных размеров при электронной температуре в несколько электронвольт имеет заряд $Z_d \sim 10^4 - 10^5$ в единицах заряда электрона. Заряд пылевых частиц пропорционален их размерам, и поэтому только очень маленькие пылевые частицы будут иметь заряды, равные некоторым электронным зарядам. Эти отрицательные заряды будут удерживаться

электрическим полем пристеночного двойного слоя. Этот слой появляется благодаря тому же физическому процессу, который приводит к появлению заряда на пылевых частицах. Электронный тепловой ток больше ионного (из-за разницы масс электронов и ионов), и как пылинки, так и стенки заряжаются отрицательно до тех пор, пока основная часть электронов, за исключением самых быстрых, не будет отражаться от пылевых частиц или стенок, и электронные токи сравняются с ионными. Различие между пылевыми частицами и стенками состоит в соотношении размеров и дебаевского радиуса. Размеры пылевых частиц обычно меньше, тогда как радиус кривизны стенок обычно много больше дебаевского радиуса. Падение потенциала в плазменном слое вблизи стенок составляет по простейшим оценкам $\phi \approx 3.8 T_e \sim 4 - 20$ В в зависимости от электронной температуры, а потенциальный барьер, удерживающий пылевые частицы в объеме плазмы, $Z_d \phi \sim (4 - 20) \times (10^4 - 10^5)$ В. Сила в плазменном слое, связанная с градиентом этого потенциала, достаточна, чтобы компенсировать как силу тяжести пылинок, так и силу увлечения потоком ионов на стенку. Этот поток возникает благодаря отрицательному потенциалу стенки, поэтому пылевые частицы могут левитировать в слое вблизи стенок как в нижней части камеры, где силы гравитации и увлечения ионным потоком действуют в одном направлении, так и в верхних частях камеры, где эти силы направлены противоположно друг другу. Но эффективная сила, приводящая к тому, что пылевые частицы могут иметь равновесные положения вблизи стенок, больше в нижней части камеры. Так как сила увлечения потоком ионов пропорциональна квадрату линейных размеров пылевых частиц (т.е. поверхности пылевых частиц), а гравитационная сила — кубу (т.е. их массе), то существует критический размер пылевых частиц, для которого гравитационная сила больше силы увлечения потоком ионов, и в верхней части камеры смогут левитировать только пылевые частицы с размером меньше критического. В любом случае нужно ожидать наличия пылевых слоев вблизи стенок ТУ с определенной вариацией их размеров вдоль поверхности.

Имеется и более глубокая физика, связанная с наличием пылевых слоев в пристеночной плазме ТУ. Дело в том, что параметры горячей и пристеночной плазмы в ТУ не являются независимыми друг от друга. На первый взгляд можно было бы думать, что зависимость не очень сильная и можно изменять параметры пристеночной плазмы, не меняя свойства горячей плазмы, и наоборот. Но это оказывается не совсем верным. Тепловой поток, который существует в горячей части плазмы, и тепловой поток вблизи стенок — один и тот же в силу закона сохранения потока. Поэтому вблизи стенок плазма переносит весь тепловой поток, генерируемый в горячей области. Имеются также непосредственные экспериментальные указания на то, что свойства пристеночной плазмы влияют на удержание горячей плазмы и тем самым влияют на параметры горячего плазменного ядра, хотя эти процессы и не полностью поняты. Вероятно, наиболее правильным утверждением является то, что холодная пристеночная плазма является некоторым граничным условием для горячего центра, и удержание плазмы сильно зависит от этого граничного условия. Примером может служить наблю-

даемый в токамаках переход от режима хорошего удержания (high confinement — Н-мода) в режим худшего удержания (low confinement — L-мода). Этот переход сильно зависит от градиентов на границе области удержания, которые в свою очередь не могут не испытывать воздействия пристеночной плазмы. В этом контексте можно ожидать, что пыль в пристеночной плазме может влиять на время глобального удержания энергии в ТУ.

Поразительным феноменом, наблюдаемым в токамаках, является так называемое самоподобие профилей (profile consistency): радиальные профили всех токамаков при соответствующем выборе радиальных переменных совпадают друг с другом. Любое локальное изменение поведения плазмы связано с глобальным распределением плазмы, и поэтому изменения в плазме вблизи стенок влияют на глобальное распределение. Наиболее элегантное и развитое представление универсальности плазменных профилей дано в [7]. Согласно [7] токамаки являются самоорганизованными системами, в которых удержание осуществляется глобально, и любые локальные вомущения "затечиваются" появлением стохастического слоя случайных магнитных полей. Концепция самоорганизации в ТУ имеет давнюю историю, начатую предложением Б. Тейлора для объяснения первых английских экспериментов ZETA. В настоящее время принцип самоорганизации используется во многих областях физики, и обзор соответствующих проблем можно найти в [8].

Процессы самоорганизации носят глобальный характер и определяют свойства физического объекта как целого. Согласно представлениям самоорганизации нельзя исключить, что изменения в пристеночной плазме токамаков из-за наличия пыли не изменят времена глобального удержания энергии; более того, можно считать это весьма вероятным.

Другой физической и технической задачей, которая может иметь отношение к наличию пыли в пристеночной плазме ТУ, является необходимость исключить возможную фокусировку теплового потока на какие-либо части стенок установки. Поэтому желательно изменить свойства пристеночной плазмы с тем, чтобы она была возможно более турбулентна. Присутствие пыли может сделать пристеночную плазму намного более диссипативной, генерируя диссипативные дрейфовые волны отрицательной энергии. Диссипация, вносимая пылью, связана с процессами зарядки пылевых частиц, которые приводят к большой частоте столкновений плазменных частиц с пылевыми (в оптимальных условиях, когда пылинок достаточно много для влияния на условие электростатической нейтральности, частота столкновений увеличена в Z_d раз, или на 4 – 5 порядков). Эта проблема обсуждалась в [9, 10], где было доказано, что наличие пыли значительно понижает порог и увеличивает инкремент дрейфовой неустойчивости, тем самым увеличивая степень плазменной турбулентности вблизи стенок. Такой эффект является желательным для увеличения однородности теплового потока на поверхность стенок. Дрейфовые микронеустойчивости могут также увеличить поток пылевых частиц со стенок подобно тому, как это происходит в случае уже упомянутых выше макронеустойчивостей теплового потока в пристеночной плазме.

Существует предложение [11] имитировать непрерывно сменяемую стенку путем инъекции "дождя"

пылинок в пристеночную плазму, уменьшая тем самым поток тепла на стенку.

Непосредственное детектирование распределения пылевых частиц обычно производится с помощью Мирассеяния лазерного излучения. Однако в современных токамаках нет удобных для этих целей окон в пристеночной области. По этой и некоторым другим причинам данный метод не применялся в токамаках. Только недавно были описаны эксперименты по лазерному рассеянию на пыли, специально внесенной в ту часть установки, где нетрудно провести эксперимент по лазерному рассеянию [12]. В целом проведение таких экспериментов в ТУ вблизи стенок является достаточно трудной задачей.

Другая возможность детектирования пыли связана с использованием коллективного рассеяния электромагнитных волн достаточно большой длины, заметно большей дебаевского радиуса экранирования пылинок [13]. Рассеяние происходит на экранирующих электронах, и для достаточной эффективности рассеяния необходимо, чтобы длина волны превосходила дебаевский радиус. Рассеяние называется коллективным, так как связано с коллективным эффектом экранирования заряда пылевых частиц. Однако коллективное рассеяние на пылинках в двойном пристеночном слое является значительно более сложным, чем в однородной плазме (случае, рассмотренном в [13]), так как толщина двойного слоя составляет всего несколько электронных дебаевских радиусов, и экранирование электронами будет весьма неоднородным. Отсутствие адекватной теории двойного слоя, который к тому же может быть сильно турбулентным, и отсутствие разработанной теории коллективного рассеяния в таком слое дополняется трудностями разделения рассеянного и исходного сигнала для рассеяния вперед.

После разрядов хорошо наблюдается эрозия поверхностей ТУ, являющаяся также косвенным свидетельством сложных процессов на поверхности, которые включают инъекцию пылинок.

Для полной диагностики пылевой компоненты ТУ желательно знать детали распределения пыли в пристеночном пространстве, распределение пылевых частиц по размерам, а также другие их характеристики.

В настоящее время при проектировании новых ТУ роль пыли в большой степени игнорируется. Сейчас только в двух областях науки занимаются исследованием взаимодействия плазмы со стенкой в будущих ТУ — в *физике плазмы и атомной физике*, имеющих дело со взаимодействием плазмы со стенками, с инъекцией нейтралов, с их ионизацией и перезарядкой, образованием примесей, диффузией и переносом в пристеночной плазме, и в *материаловедении*, имеющем дело со свойствами различных материалов, подверженных воздействию больших тепловых потоков, плавлению и испарению материалов поверхностей и т.п. Становится все более ясным, что такой раздел науки, как *физика пылевой плазмы*, должен быть включен в программы исследований областей между стенками и частично ионизированной плазмой ТУ. В этой области пыль может быть ответственна за существенное изменение свойств плазмы, явлений переноса, генерации примесей и, что наиболее существенно, она может быть ответственна за изменение структуры двойного слоя и глобального удержания.

По-видимому, до сих пор проводимые исследования, базирующиеся на методах физики плазмы, атомной физики и материаловедения, являются адекватными только при относительно небольших тепловых нагрузках на стенки ТУ. Большие энергетические нагрузки ожидаются для нового поколения ТУ таких, как ИТЕР. Они уже велики и в существующих ТУ при неустойчивостях срыва. В случае очень больших нагрузок образование пылевого слоя между стенками и плазмой кажется почти неизбежным, и его исследование может быть проведено только на базе современной физики пылевой плазмы. Физика пылевой плазмы находится в стадии бурного развития, сопровождающегося новыми открытиями, включая новую физику взаимодействия пылевых частиц между собой [14]. Можно предвидеть, что будущие исследования по ТУ с большими нагрузками и длительным разрывом потребуют, чтобы физика пылевой плазмы была привлечена достаточно полно.

Сопроводим некоторыми дополнительными комментариями результаты, полученные для современных ТУ.

1. Макрочастицы могут играть важную роль в ТУ. Хотя об их наличии было известно давно, но на возможное влияние на работу ТУ и характер проводимых экспериментов было обращено внимание только недавно [4, 10, 12].

2. Пылевые частицы обычно находят на дне ТУ после некоторого периода их работы.

3. Пылевые частицы рассматриваются как важный элемент в системе безопасности ИТЕРа [6, 15] и будущих ТУ благодаря большому накоплению трития и благодаря их очень большой реактивности в случае течи в вакуумной системе или системе охлаждения.

4. Представляется весьма вероятным, что пылевые частицы, образовавшиеся в предыдущих разрядах, будут вновь инжектированы в разряд, что приведет к накоплению пыли в пристеночной плазме. Эта пыль может служить триггером для новых неустойчивостей срыва, может влиять на граничные условия для горячей компоненты и сказываться на характере разряда.

5. Если считать, что сильно диссипативный слой пыли образуется между плазмой и стенкой, то он может служить известным препятствием, приводящим к расширению и сглаживанию тепловых потоков из-за усиления диссипативных дрейфовых неустойчивостей [9, 10].

6. Наиболее важными механизмами образования пыли являются процессы испарения и сублимации перегруженной тепловыми потоками поверхности, что имеет место, в частности, и в течение неустойчивостей срыва. Другой механизм генерации пыли связан с разрушением тонких поверхностных пленок на стенках, существование которых связано с методикой подготовки вакуумных поверхностей стенок ТУ [16]. Униполарные дуги освобождают капли расплавленного металла. Помимо этих "пассивных" механизмов плазма сама инициирует рост пылинок внутри объема приповерхностной плазмы из больших молекулярных комплексов, испаряемых со стенок. Такой механизм особенно важен при длительной работе установок. Начальная стадия роста инициируется распылением атомов поверхности, включая окиси углерода, которые возникают при химической эрозии графитовых стенок и тонких пленок углерода бора и кремния, покрывающих стенки [5, 16]. Для пристеночной плазмы, не касающейся диафрагм, имеется достаточная концент-

рация метана (от 5 до 10 %) в нейтральной компоненте плазмы, если считать, что углеводород испускается с поверхностью с тепловыми скоростями, а эффективный выход при химической эрозии составляет 1–2 %. Не считая несколько больших значений электронных плотностей, эти условия весьма близки к тем, которые имеют место для условий плазменного травления [1], где регулярно наблюдается образование и рост пылевых частиц.

7. Благодаря топологии пристеночной плазмы отрицательно заряженные частицы, возникшие при прилипании электронов, в том числе и пылевые частицы, будут хорошо удерживаться в пристеночной плазме. Потенциальный барьер двойных слоев перед диафрагмами не позволяет им достигать поверхности, а магнитное поле удерживает их в радиальном направлении из-за того, что ларморовский радиус мал благодаря малым скоростям пылевых частиц.

8. К сожалению, до сих пор не проводились систематические исследования пылевых частиц в ТУ. Для расчета и построения физических моделей пылевых слоев в ТУ необходимо знать не только распределение плотности пылевых частиц, но и их распределение по размерам и скоростям.

3. Проблемы, ожидающие решения

Основные проблемы, связанные с образованием пылевого слоя в приграничной плазме ТУ, можно сформулировать следующим образом.

1. Действительно ли происходит формирование пылевого слоя в пристеночной плазме, и при каких критических тепловых нагрузках он начинает определять характеристики разряда?

2. Каков баланс роста, испарения и агломерации пылевых частиц в плазму ТУ, и возможны ли равновесные пылевые слои, когда пыль образуется вблизи стенок и испаряется на горячей стороне слоя?

3. Может ли баланс пылевых частиц быть устойчивым, и при каких условиях возможен непрерывный рост пылевых частиц во все время разряда?

4. Какова возможная толщина пылевого слоя, и как она зависит от уровня турбулентности?

5. Какая часть пыли, генерируемой в предшествующих разрядах и неустойчивостях срыва, вновь инжектируется в последующих разрядах?

6. Может ли аккумулируемая пыль быть в определенной степени триггером последующих неустойчивостей срыва?

7. Поскольку токамаки являются самоорганизованными системами с явлением подобия профилей, не могут ли L–H-переходы, связанные с граничными условиями в пристеночной плазме, в определенной степени зависеть от аккумуляции пыли в пристеночной плазме?

8. Какие могут быть положительные эффекты присутствия пыли в пристеночной плазме ТУ, и как они могут быть использованы?

9. Какого типа диагностика пылевых частиц наиболее удобна в ТУ?

10. Может ли наличие пыли в пристеночной плазме изменить явления переноса и генерацию примесей?

11. Какие регулярные когерентные пылевые структуры могут формироваться в пристеночной плазме, и какова может быть их связь с уже наблюдаемыми

когерентными структурами в пристеночной плазме токамаков?

12. К каким опасностям приведет аккумуляция трия в пыли ТУ?

Ответы на эти и другие вопросы, по всей вероятности, могут быть найдены в будущих исследованиях.

4. Агломерация пыли

Изложим современное состояние проблемы агломерации пыли в плазме, так как этот вопрос важен для объяснения недавних экспериментов по детектированию пыли в ТУ, которые позволяют сделать заключение о том, что пыль в ТУ существует в плазменном объеме (внедрена в плазму) и образует, скорее всего, некий пылевой слой в пристеночной плазме.

Агломерацией пылевых частиц называют явление слипания пылевых частиц с образованием пылевых частиц больших размеров. Это явление наблюдается в большинстве установок по плазменному травлению. Конечно, его можно легко понять как процесс притяжения пылевых частиц из-за поверхностных молекулярных взаимодействий (если бы пылинки не имели зарядов). Но наблюдаемые явления могут вызвать удивление. Эксперименты по травлению показывают, что пылевые частицы непрерывно растут в размерах в течение процесса травления. Так как в плазме заряд пылевых частиц пропорционален их размеру, то растущие пылевые частицы будут непрерывно увеличивать свои заряды и тем самым будут увеличиваться кулоновские силы, пропорциональные квадрату заряда Z_d . В конце концов кулоновское отталкивание пылевых частиц должно предотвратить их дальнейшую агломерацию. Наблюдается же нечто иное. Агломерация происходит в две стадии, а рост размеров имеет три стадии.

Первая стадия, подробно исследованная в [2], казалось бы, подтверждает утверждение о том, что пылевые частицы будут слипаться до тех пор, пока заряды на них не станут достаточными для того, чтобы кулоновские силы отталкивания предотвратили дальнейшую агломерацию.

После окончания этой стадии пылевые частицы продолжают расти, но благодаря депозиции материала из плазмы на поверхность пылевых частиц. На этой стадии роста агломерация не возникает. Интересно, что пылевые частицы любой формы, но с размерами, соответствующими этой стадии, будучи инжектированы в плазму, быстро становятся почти сферическими. Это является указанием на то, что пылевые частицы этих размеров растут из-за депозиции материала из плазмы. Формирование почти полностью сферической пылевой частицы является возможным только в том случае, если пылевая частица находится внутри плазмы, поскольку только в этом случае потоки депозирируемого материала будут сферическими. Поэтому если наблюдаются пылевые частицы почти сферической формы, то они находились внутри плазмы долгое время, достаточно для значительной депозиции материала из плазмы.

После окончания второй стадии роста, когда размер пылевых частиц достигает определенной величины, наступает следующая стадия — вторая стадия агломерации, формирующая пылевые частицы с характерной фрактальной формой типа "цветной капусты" [1–3]. Эта вторая стадия агломерации начинается в условиях,

когда размер пылевых частиц превышает некий критический размер. В установках по плазменному травлению этот критический размер составляет примерно 10 мкм, тогда как первый этап агломерации заканчивается при размерах около 0,1 мкм. Наличие пылевых частиц в форме "цветной капусты" также является указанием на то, что пылевые частицы находились в объеме плазмы долгое время, достаточное для прохождения второй стадии агломерации.

Вторая стадия агломерации была объяснена сравнительно недавно [17] как стадия, на которой термофоретическое притяжение пылевых частиц превышает их кулоновское отталкивание. Указанные силы притяжения так же, как и силы кулоновского отталкивания, обратно пропорциональны квадрату расстояния между пылевыми частицами; они зависят от плотности нейтральной компоненты и являются силами притяжения в случае, когда температура поверхности пылевых частиц меньше температуры нейтральной компоненты [17, 18]. Физика появления этих сил следующая: понижение температуры нейтралов вокруг одной из пылевых частиц действует на другую пылевую частицу, как ее притяжение к области более низких температур. Термофоретические силы определяются градиентом температуры и направлены в сторону понижения температуры. Возникающие силы притяжения пропорциональны разнице пылевых частиц в четвертой степени ($\propto a^4$), давлению нейтрального газа ($n_n T_n$) и разности температур поверхности пылевых частиц и нейтральной компоненты. Пылевые частицы холоднее, чем окружающие частицы нейтрального газа (и это приводит к силам притяжения) в том случае, если они нагреваются бомбардировкой нейтральными частицами и охлаждаются за счет радиационных потерь. Тепловой баланс устанавливает разницу температур пылевых и нейтральных частиц, которая зависит от концентрации последних (n_n). Это может привести к насыщению сил притяжения с ростом плотности нейтральных частиц. Для малых плотностей разница температур практически не зависит от концентрации, и поэтому силы притяжения растут линейно с ростом плотности частиц. Для n_n , превосходящих некоторую критическую плотность n_{cr} , разница температур становится обратно пропорциональной n_n и силы притяжения становятся независимыми от плотности нейтральных частиц при дальнейшем ее нарастании. Сила притяжения F_a оценивается как [18]

$$F_a \approx c \frac{a^4}{r^2} T_n n_n \quad (1)$$

для $n_n \ll n_{cr}$ и для $n_n \gg n_{cr}$ при подстановке в (1) n_{cr} вместо n_n ; c — константа порядка 1 и

$$n_{cr} = \mu \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2} m_n T_n^5}, \quad (2)$$

где $\sigma = 3,9 \times 10^{19} \text{ см}^{-3} (K)^{-5/2} g^{-1/2}$, μ — коэффициент серости пылевых частиц (коэффициент в законе Стефана – Больцмана для излучения пылевых частиц), который тоже порядка 1.

Мы привели эти результаты, так как хотим с позиции физики агломерации дать возможное объяснение агломерации, наблюдавшейся в недавних экспериментах, где анализировалась пыль на установке ТЕКСТОР-94 (TEXTOR-94).

Покажем также, как оценить заряды пылевых частиц, которые препятствуют агломерации. Потенциал пылинок является плавающим потенциалом, или, более точно, различие между потенциалом пылинок и потенциалом окружающей плазмы должно быть порядка электронной температуры. Это условие в терминах безразмерного заряда z означает, что z должно быть порядка 1, где

$$z = \frac{Z_d^2 e^2}{a T_e} . \quad (3)$$

Эта оценка справедлива для зарядки пылинок плазменными токами при отсутствии ультрафиолетового излучения, которое может заряжать пылевые частицы положительно из-за фотоэффекта.

Физическое объяснение второй стадии агломерации, наблюдавшейся в установках по плазменному травлению, и оценка размеров пылинок, начиная с которых она возникает, очевидны из приведенных формул. Кулоновские силы отталкивания пропорциональны a^2 , тогда как силы притяжения (1) пропорциональны a^4 , и при определенных достаточно больших размерах притяжение будет доминировать. Условие агломерации тогда будет иметь вид

$$n_n a^2 a_0 \frac{T_n}{T_e z^2} \geq 1 . \quad (4)$$

Получаемое из (4) при знаке равенства значение a_{cr} хорошо соответствует его наблюдаемому значению в большинстве установок плазменного травления.

5. Эксперименты по анализу пылевых частиц в установках управляемого термоядерного синтеза

Рассмотрим, наконец, данные последних экспериментов по анализу пылевых частиц в ТУ. В [19] были собраны и тщательно проанализированы пылевые частицы после разрядов в токамаке ТЕКСТОР-94. Основной результат состоит в том, что многие из собранных частиц имели почти идеальную сферическую форму или форму "цветной капусты", что возможно только, если пылевые частицы в течение разрядов были внедрены в плазму и удерживались в ней в течение разряда в виде пылевого слоя в пристеночной плазме. Это также указывает на то, что процессы агломерации пылевых частиц были достаточно эффективными в течение времени пребывания этих частиц в плазме.

Прежде всего нужно заметить, что параметры в пристеночной плазме ТУ указывают на то, что стадия агломерации, соответствующая малым зарядам пылевых частиц (первая стадия агломерации), менее вероятна в ТУ, а благодаря относительно большой температуре водородсодержащих нейтральных частиц вторая стадия агломерации будет соответствовать ненасыщенной агломерации. Знак заряда, который несет заряженные пылевые частицы (положительный или отрицательный), зависит от интенсивности ультрафиолетового излучения в пристеночной плазме. При достаточной интенсивности последнего электроны испускаются пылевыми частицами благодаря фотоэффекту, и пылинки заряжаются положительно (если зарядка из-за фотоэффекта домини-

рует над зарядкой плазменными токами). Критерий агломерации не зависит от знака заряда пылевых частиц (зависит от квадрата заряда) и может быть использован в приведенном выше виде.

Для температур, приведенных выше, критическое значение $a_{cr} > 10-20$ мкм. Когда заряд на пылевых частицах определяется плазменными токами, величина Z_d будет достаточно большой — больше, чем 10^5 . Пылевые частицы с такими зарядами оказываются на зарядовом балансе уже при малой плотности порядка $10^{-5} n_e$, и в этих условиях пылевые частицы могут существенно изменить динамику пристеночного слоя.

Доказательство того, что описанный выше процесс агломерации пылевых частиц действительно имеет место в ТУ, дали недавние исследования пыли, собранной в токамаке ТЕКСТОР-94 [19]. ТЕКСТОР-94 представляет собой токамак средней величины с большим радиусом тора $R_{major} = 1,75$ м и малым радиусом тора $R_{minor} = 0,46$ м. ТЕКСТОР-94 имеет большую площадь поверхности графитовых диафрагм, и в его конструкции используется стандартная процедура покрытия стенок пленками бора (боронизация). Собранные пылевые частицы были проанализированы визуально с помощью сканирующего электронного микроскопа; были также проанализированы их магнитные свойства. Состав пылевых частиц исследовался путем анализа энергетической дисперсии рентгеновских лучей (Energy Dispersive X-ray Analysis).

Частицы имели широкое распределение по шкале размеров — от миллиметров до 100 нм.

Примерно 15–20 % собранных частиц, включая наиболее мелкие из них, были ферромагнитными, хотя никакие магнитные материалы не использовались в конструкции стенок камеры. Среди магнитной фракции были найдены богатые железом частицы сферической формы с диаметром от 0,1 до 0,01 мм. Они, скорее всего, образовались путем изгиба или агломерации под воздействием поверхностного натяжения перегретых металлических слоев на графитовой поверхности. Их почти идеальная сферическая форма может, однако, возникнуть при многократном последовательном взаимодействии с пристеночной плазмой при повторных левитациях частиц (см. выше). Материал этих частиц берется из компонент нержавеющей стали стенок. Благодаря плавлению и последующему затвердеванию они, наверное, теряли некоторые компоненты сплава (Cr) и магнитные свойства, сохранив ферритную структуру. Некоторые сферы имеют доменную структуру с характерной длиной доменов порядка 30 мкм и характерной шириной доменов порядка 2–3 мкм. Магнитные частицы представляют собой хлопья вновь депозированных углеродных пленок с некоторыми включениями других материалов. Эти хлопья с ферромагнитными свойствами, возможно, возникли в результате повторной депозиции углеродных, борных и кремниевых материалов с низким значением Z со следами металлических примесей и затем левитировали в плазме [15]. Химическая эрозия и депозиция материала будут преимущественно убирать углеродные матрицы, делая слои более богатыми металлами. Это в конечном счете приводит к достаточно большой концентрации металлов, делая пленки магнитными. Магнитные частицы скорее всего затягиваются в магнитное поле установки и левитируют в области больших магнитных полей — в экваториаль-

ной области (области максимума B). Это должно возникать в стадии нарастания тороидального поля до пробоя разряда. Наличие этих частиц поэтому может быть причиной часто наблюдаемых проблем в начальной стадии разрядов в токамаках.

Примерно 80 % частиц не являются магнитными, включая хлопья тонких пленок C/B/Si, графитовых кристаллитов и кремниевых частиц.

Существует много частиц субмикронного размера, которые в свою очередь являются агломератами частиц с размерами 100–300 нм. Форма последних является круглой с диффузными краями и аналогична фрактальным частицам в виде "цветной капусты", наблюдаемым в экспериментах по плазменному травлению [1].

Идентификация именно таких частиц в ТУ рассматривается как сильный аргумент в пользу того, что они росли внутри области пристеночной плазмы. Часть относительно больших частиц с размерами 1–100 нм вполне может быть образована в процессах агломерации, описанных выше, на что указывает оценка критических размеров по формуле (4).

6. Заключение

Обнаружение в ТУ после разрядов пылевых частиц почти сферической формы и фрактальной формы типа "цветной капусты" является сильным, но все же косвенным доказательством того, что в течение большей части времени разрядов они находились внутри плазмы в пристеночной области ТУ. Сейчас идут эксперименты по непосредственному их детектированию по рассеянию в объеме плазмы. Обнаружение ферромагнитных пылевых частиц также указывает на то, что в действительности взаимодействие плазмы со стенками довольно сложное и требует детального исследования, особенно при длительной работе ТУ и больших энергетических нагрузках.

Один из авторов (В.Н.Ц.) признателен К. Лашмор-Дэвис за обсуждение данного материала в течение и после

лекций в Каламской лаборатории (Англия), Дж. Жакино и А. Гибсону в лаборатории ДЖЭТ (Англия) и С. Хамергеру и Р. Дюару в Австралийском университете. Авторы признательны за дискуссии по данной проблеме на рабочей группе по пылевой плазме (Бад-Хоннф, 10–15 января 1997 г., Германия).

Список литературы

1. Garscadden A et al. *Plasma Sources Sci. Technol.* **3** 239 (1994); *Proc. of NATO Advanced Research Workshop on Formation, Transport and Consequences of Particles in Plasmas* (Chateau de Bonas, Caster-Verduzan, France)
2. Boufendi L, Boushoule A *Plasma Sources Sci. Technol.* **3** 262 (1994)
3. Kamata N et al. *Plasma Sources Sci. Technol.* **3** 310 (1994)
4. Winter J "Dust in Fusion Plasmas" *Abstracts 170 WE Heraeus Seminar, BadHonnen Germany 15–17 Jan. 1997*
5. Winter J "Control of Plasma Surface Interactions by Thin Films", in *Phys. Processes of the Interaction of Fusion Plasmas with Solids* (Eds W O Hofer, J Roth) (Academic Press, 1996)
6. Piet S J et al. *Proc. 17 IEEE/NPSS Symp. Fusion Engineering* (San Diego, Oct., 1997)
7. Kadomtsev B B *Comments Plasma Phys. Controlled Fusion* **11** 153 (1987); **34** 1931 (1992)
8. Hasegawa A *Adv. Phys.* **34** 1 (1985)
9. Benkadda S, Tsytovich V N, Verga A *Comments Plasma Phys. Controlled Fusion* **16** 307 (1995)
10. Benkadda S, Gabai P, Tsytovich V N, Verga A *Phys. Rev. E* **53** 2717 (1996)
11. Mirnov S M, Dem'yanenko V N, Murav'ev E F *J. Nucl. Materials* **196–198** 45 (1992)
12. Naribara K et al. *Nucl. Fusion* **37** 1177 (1997)
13. Tsytovich V N, de Angelis U, Bingham R J. *Plasma Phys.* **42** 429 (1989)
14. Цытович В Н *УФН* **167** 57 (1997) [*Phys. Usp.* **40** 53 (1997)]
15. Weinhold P et al. *J. Nucl. Materials* **176–177** 150 (1990)
16. Winter J *Plasma Phys. Controlled Fusion* **38** 1 (1996)
17. Tsytovich V N, Khodataev Ja K, Morfill G, Winter J *Comments Plasma Phys. Controlled Fusion* **18** 321 (1997)
18. Khodataev Ja K, Morfill G, Tsytovich V N *J. Plasma Phys.* **50** 322 (1997)
19. Winter J *Proc. 24. EPS Conf. on Controlled Fusion and Plasma Phys. 9–13 June, 1997* (Bergtegaden, Germany); *Plasma Phys. Controlled Fusion* (submitted)

On the role of dust in fusion devices

V.N. Tsytovich

*General Physics Institute, Russian Academy of Sciences,
ul. Vavilova 38, 117942 Moscow, Russia
Tel. (7-095) 135 02 47. Fax (7-095) 135 02 70
E-mail: tsyt@ewm.gpi.ru; tsytov@td.lpi.ac.ru*

J. Winter

*Institut für Experimentalphysik II (Anwendungsorientierte Plasmaphysik)
Ruhr-Universität Bochum, D-44780, Bochum and Institut für Plasmaphysik, Julich GmgH, IPP,
52425, Julich, Germany
Tel. + 49 (0) 234 700 3800/3693. Fax + 49 (0) 234 7094 171
E-mail: jw@plasma.ep2.ruhr-uni-bochum.de*

The recently addressed problem of dust in the vicinity of the walls of Controlled Thermonuclear Devices (CTD) is discussed. It is pointed out that conditions in the Scrape off Layer and divertor are similar to those in low-temperature plasma processing devices where dust is a common occurrence. In the absence of *in situ* dust diagnostic techniques for present day CTD plasmas, indirect indications of the possible role of dust are analyzed. Most recent data on after-discharge dust suggest that during a discharge dust is confined for a long time inside the edge plasma. It is emphasized that the CTD dust problem assumes more significance for larger power loadings and longer operation times expected for new devices such as ITER.

PACS numbers: **28.52.-s, 52.40.Hf, 52.55.-s, 81.90.+s**

Bibliography — 19 references

Received 5 January 1998