

## О ПРОБЛЕМЕ ОБНАРУЖЕНИЯ МИКРОТЕЧЕЙ ВОДЫ В КАМЕРЕ ТОКАМАКА

А. Б. Антипенков<sup>1</sup>, О. Н. Афонин<sup>2</sup>

*Проведена оценка существующих методов течеискания в вакуумных камерах, и сделан вывод о перспективах их использования в камере токамака для обнаружения микротечей. Приведены размеры микротрещин и скорости натекания, наиболее часто встречающиеся при контроле герметичности ТВЭЛов. Предложена методика контроля образования микротрещин в камере токамака на основе лабораторных исследований. Проведена серия экспериментов, подтверждающая высокую чувствительность предложенного метода.*

**Ключевые слова:** спектроскопия, микротечи, токамак.

Малые течи вплоть до микронного размера в стенке вакуумных или герметичных камер обычно могут быть обнаружены рутинными методами [1]. Однако эти методы не позволяют обнаруживать субмикронные течи, особенно если камеры имеют большой объем и входят в состав сложных технических устройств. Принято считать, что субмикронные течи практически не влияют на работоспособность таких устройств, поскольку натекание газа через них обычно находится на уровне гажения стенок камеры, а сами течи в спокойных условиях могут залипнуть. Но это не так и задача обнаружения субмикронных течей не только актуальна, но и приобретает особую остроту для таких устройств, как токамаки, ТВЭЛы ядерных реакторов, химические реакторы, космические аппараты и т.п. При эксплуатации подобных устройств стенки камер испытывают огромные нагрузки, в результате имеющиеся субмикронные течи могут расширяться и образовываться новые, создавая реальную угрозу развития аварийной

<sup>1</sup> Международная организация ИТЭР, Кадараш, Франция, Office 24, Building 525b, e-mail: antipenkov@itp.fzki.de.

<sup>2</sup> Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Ленинский проспект, д. 53, e-mail: afonin@lebedev.ru.

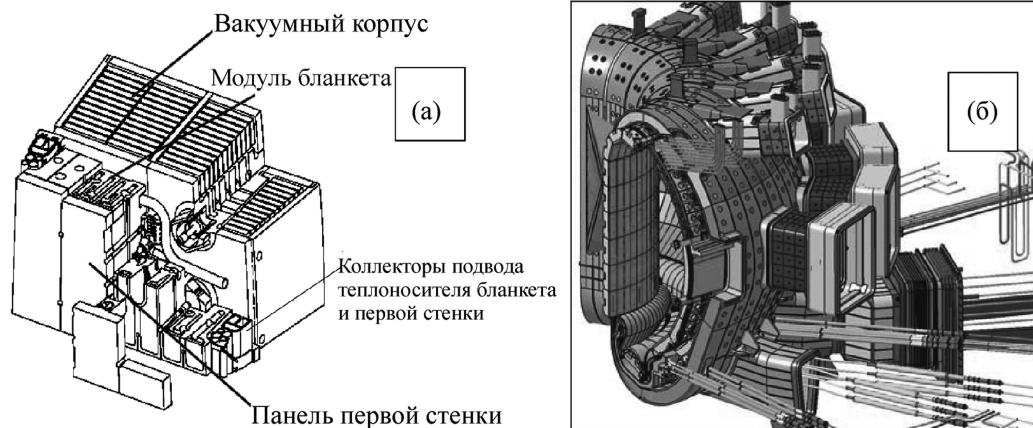


Рис. 1: (а) Конструкция стенки камеры ИТЭР, вид со стороны плазмы (модуль условно разрезан, часть первой стенки отодвинута); (б) сектор ИТЭР.

ситуации. Особенно остро задача обнаружения микротечей будет стоять в условиях работы ИТЭР, поскольку радиационные и другие нагрузки на стенку будут достигать в этом случае экстремальных значений. Эта задача была отмечена в заключительном отчете по техническому проекту ИТЭР [2] как одна из существенных, но не получивших пока достаточного решения. Здесь имеется в виду микротечи охлаждения, через которые происходит натекание паров воды. В отчете установлена предельная глобальная граница натекания на уровне  $10^{-7}$  Па·м<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>, обусловленная требованием поддержания должной чистоты плазмы. На рис. 1, воспроизведенном из доклада [3], показан в разрезе типичный фрагмент конструкции стенки камеры ИТЭР. Охлаждаемые панели первой стенки прикрывают охлаждаемые модули blankets, смонтированные на охлаждаемом вакуумном корпусе. Наиболее вероятно образование микротечей в сварных швах модулей первой стенки и blankets габариты которых составляют  $1 \times 1 \times 1.4$  [м], и зазор между ними  $\sim 1$  см. Относительно легко обнаружить течи на лицевой стороне панели первой стенки и существенно сложнее, если течь образовалась внутри стенки и скрыта элементами ее конструкции.

Есть два сценария обнаружения и ремонта поврежденных модулей. Рутинный сценарий: длительная остановка реактора; введение детектируемого маркера последовательно в каждый из пяти контуров теплоносителя; обнаружение с его помощью дефектного контура глобальной системой течеискания; извлечение 90 модулей, питаемых от него; наконец, индивидуальное обследование каждого из этих модулей в горячей камере и ремонт. Понятно, что этот длительный и дорогой путь может быть использован лишь в

случае крайней необходимости. В техническом проекте предусмотрен другой сценарий: обнаружение дефектного модуля во время паузы подходящей системой поиска микротечей и замена этого модуля на месте с помощью манипулятора. Конечно, реализация этого сценария возможна только при наличии соответствующей системы поиска, которую надо создать.

В составе технического проекта ИТЭР был выполнен определенный объем НИОКР по методам обнаружения течей. В частности, был предложен спектроскопический метод обнаружения течи по ИК линии кислорода, возбуждаемой в тлеющем разряде, однако достигнутая обнаружительная способность оказалась недостаточной – всего  $10^{-6}$  Па·м<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>, при пространственном разрешении несколько м<sup>2</sup>. Хорошее пространственное разрешение могут дать лазерные методы (по резонансной флюоресценции и по поглощению), но их обнаружительная способность оказалась не лучшей. Обсуждаются предложения о введении в воду каких-либо газообразных маркеров (например, ксенона), но обнадеживающих оценок их эффективности пока нет. Гелиевый течеискатель обладает чувствительностью ниже требуемой; кроме того, его применение требует полной осушки системы охлаждения, т.е. для оперативного контроля он не пригоден. Рассматриваются также акустические методы (пока граница обнаружения на уровне 100 мкм), метод введения в камеру мобильных датчиков, которые смогут сканировать стенку, наподобие гелиевого течеискателя, но пока не решены трудности с тем как такую систему можно будет ввести в камеру токамака.

В этой ситуации мы обратили внимание на принципиальную возможность достижения требуемых значений обнаружительной способности и пространственного разрешения, при помощи спектроскопического метода, путем измерения интенсивности излучения в 0-0 полосе радикала  $\text{OH}^*$  [4], возбуждаемого в газовой “шапке” над течью вспомогательным тлеющим разрядом [5, 6]. В [4] было установлено, в частности, что в типичных условиях ИТЭР при давлении воды в системе охлаждения камеры 4 МПа, температуре 450 К и длине цилиндрического канала отверстия 1 см скорость поступления воды составит  $1.5 \cdot 10^{-4}$  Па·м<sup>3</sup>/с (или  $3 \cdot 10^{16}$  мол·с<sup>-1</sup>) через отверстие радиусом 1 мкм,  $10^{-8}$  Па·м<sup>3</sup>/с через отверстие радиусом 0.1 мкм и  $10^{-10}$  Па·м<sup>3</sup>/с через отверстие 0.03 мкм. Скорость потока в канале отверстия,  $v_k$ , составит, соответственно, 1 м/с, 1 см/с и 0.1 см/с.

В результате проведенных расчетов и по данным литературы [1, 4, 6] (табл. 1) были проанализированы существующие методы контроля герметичности и диапазон выявляемых течей при контроле герметичности ТВЭЛов ядерных реакторов. Было предло-

жено установить нижнюю предельную границу для обнаружения микротечи на уровне 0.2 мкм.

Т а б л и ц а 1

Метод течеискания		
Метод	Принципиальные основы метода	Порог чувствительности к потоку, м <sup>3</sup> ·Па/с
Масс-спектрометрический	Выделение и регистрация проникающего через течи пробного вещества путем разделения ионов разных газов по отношению их массы к заряду в электрических и магнитных полях.	10 <sup>-14</sup>
Галогенный	Регистрация пробного вещества через течи по увеличению эмиссии положительных ионов с накаливаемой металлической поверхности при попадании на нее галогенов.	10 <sup>-9</sup>
Вакуумметрический	Регистрация изменения давления $P$ или состава газовой среды в вакуумированной полости в результате натеканий	10 <sup>-9</sup>
Электронзахватный	Регистрация перетекания через течи электроотрицательных пробных веществ, склонных к образованию отрицательных ионов, по изменению тока разряда.	10 <sup>-10</sup>
Плазменный	Регистрация перетекания через течи электроотрицательных пробных веществ по измерению частоты срывов колебаний высокочастотного генератора.	10 <sup>-10</sup>
Пузырьковый	Регистрация пузырькового воздуха, проникающего через течи в изделии, погруженном в жидкость или покрытом мыльной или другой пленкой, способной образовывать пузыри.	10 <sup>-9</sup>

*Современные методы течеискания.* Существующие методы диагностики приведены в табл. 1. По уровню чувствительности они все подходят, но все они требуют осушки системы охлаждения, что делает их непригодными для оперативного контроля образования и локализации места образования микротечи в условиях, когда реактор еще сохраняет работоспособность.

Из этих методов самый чувствительный масс-спектрометрический, его планируют использовать в ИТЭР как для контроля герметичности на этапе сборки реактора, т.е. для проверки всех отдельных узлов, так и во время работы реактора в те промежутки времени, когда будет проводиться профилактический ремонт установки, т.к. этот метод широко известен и обладает высокой обнаружительной способностью.

Для любых из этих методов, включая предложенный нами, нужно будет решить две задачи:

1. Качественная – обнаружение течи, т.е. нужно определить место, откуда поступает вода.

2. Количественная – оценка скорости натекания.

1. Идея спектрометрического метода обнаружения течи воды основана на том, что путем воздействия на стенку плазмой или потоком электронов можно разложить вытекающие пары воды и возбудить свечение той компоненты ( $H_2O$ , H, O, OH, маркер), некоторый характерный участок спектра свечения которой  $\Delta\lambda$  можно наблюдать и измерять с минимальным уровнем помех. Если параметры действующей электронной компоненты достаточны для эффективного возбуждения, то над течью образуется “шапка”, хорошо излучающая в области  $\Delta\lambda$ . В этом случае решение поставленной задачи сводится к выбору наблюдаемой компоненты и оптимизации условий возбуждения и наблюдения ее спектра  $\Delta\lambda$ . Удобнее это сделать в процессе обработки внутренней поверхности камеры вспомогательным разрядом, хотя возможен и непрерывный мониторинг в штатном режиме работы ИТЭР.

2. Вторая часть наиболее сложна именно с учетом условий ИТЭР. Поскольку величина микротечи задана на уровне 1 мкм и выше (этот выбор обусловлен разумным подходом к стоимости диагностики и времени ее проведения), то это соответствует натеканию на уровне  $10^{-6}$  Па/м<sup>3</sup>с. В работе [7] были изучены размеры выявляемых микротрещин в ТВЭЛах ядерных реакторов на этапе их подготовки к эксплуатации и выявлены наиболее часто встречающиеся дефекты в материале и их размеры. Натекания через последние лежали в диапазоне  $10^{-9} - 10^{-7}$  Па/м<sup>3</sup>с.

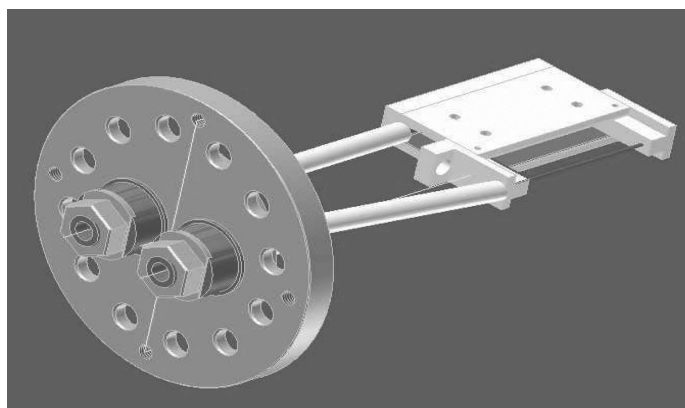


Рис. 2: Разрядное устройство с полым катодом.

При этом вид и размер наиболее часто встречающихся дефектов могут быть сильно различными, например, размер микротрещин имеет довольно большой разброс 0.2–500 мкм и больше, да и геометрия трещин разнообразна, это могут быть цилиндрической формы каналы, или сложные вытянутые в одном направлении трещины, для которых вообще говоря трудно определить эквивалентный размер. Наши расчеты были сделаны для канала, имеющего цилиндрическую форму. Что касается вытянутых трещин, то их поведение практически не изучено. В условиях ИТЭР материалы будут подвергаться экстремальным термическим, механическим и радиационным нагрузкам, учет всех этих факторов крайне сложен и зачастую невозможен, так как условия работы нестационарные.

Поэтому мы считаем, что наиболее эффективно в данном случае провести ряд отдельных экспериментов, охватывающих большое количество различных вариаций условий (различные концентрации электронов, газовый состав, энергия разряда, условия возбуждения интересующих нас компонентов и др.), моделирующие условия, ожидаемые в ИТЭР, для того чтобы выявить наиболее общие зависимости поведения и развития микротрещин, а дальше уже использовать полученную информацию для обеспечения безопасности работы на установке.

С другой стороны нам также нужно предложить рекомендации по модернизации оптической системы диагностики ИТЭР, для того чтобы приспособить ее к детектированию образования микротрещин. По нашим оценкам удобно будет использовать автоматические спектрометры, настроенные на заданный участок спектра, с возможностью вывода всей информации через ПЗС-приемник сразу в компьютер, где можно будет сразу определить наличие и место образования микротрещин.

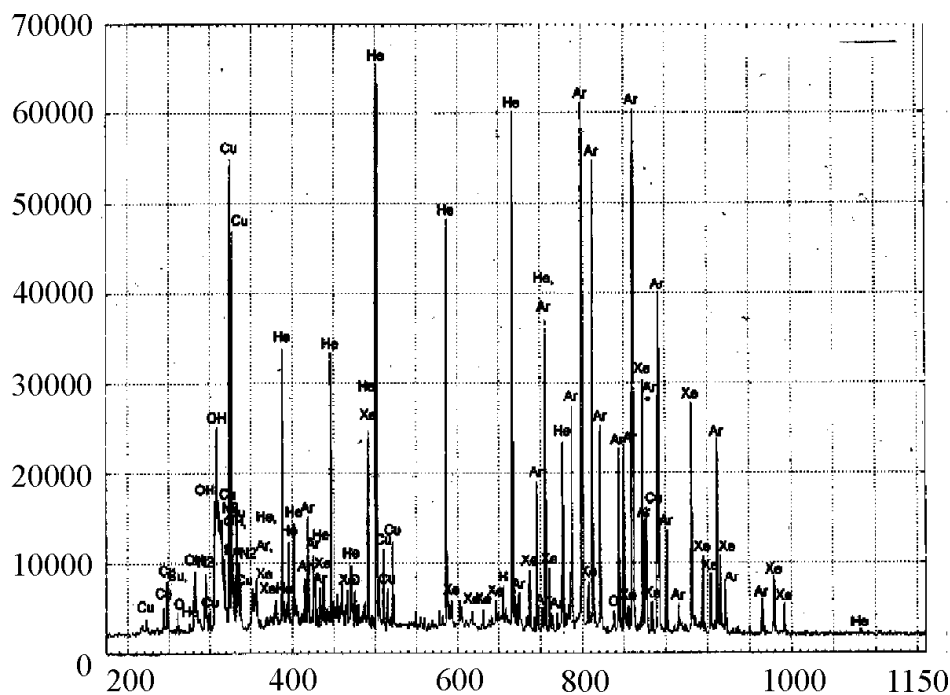


Рис. 3: Спектр свечения гелиевой плазмы.

Экспериментальное подтверждение чувствительности спектроскопического метода. Для исследования условий образования микротечей на установке “Течь” нами была собрана схема с полым катодом (рис. 2), размер полости был 5 см. С помощью этой схемы мы имитировали зазор между бланкетными модулями первой стенки ИТЭР, с целью исследования механизмов возбуждения паров воды внутри зазора и проверки чувствительности метода обнаружения микротечей.

Была проведена серия экспериментов с подачей воды через точечный натекатель, аналогичный “точечной” микротечи. На рис. 3 показан спектр свечения плазмы, полученный на установке “Течь”. Разряд в полем катодом зажигался при давлении 0.7 Торр, буферный газ-гелий, напряжение  $U \sim 500$  В, ток  $I \sim 400$  мА. Спектр регистрировался при помощи спектрометра AvaSpec-2048 $\times$ 14 (спектральный диапазон 200–1100 нм, разрешение 0.8 нм, время накопления от 1 мс до 10 мин.). По линиям 306–309 нм удалось зафиксировать концентрацию гидроксила на уровне  $10^{11}$  ч/см<sup>3</sup>. При этом отчетливо видно пятно свечения размером 1–3 см.

Таким образом, проведенные эксперименты подтверждают, что можно с помощью спектрометрического метода локализовать с точностью лучше 10 см микротрещины размером  $\sim 1$  мкм, как в случае “точечной” микротечи, так и для случая “скрытой”

микротечи. Чувствительность метода, показанная в экспериментах, лежит на уровне  $10^{11}$  ч/см<sup>3</sup> при фоновой концентрации гидроксила  $\sim 10^{10}$  ч/см<sup>3</sup> и должна достигать  $10^{10}$  ч/см<sup>3</sup> при фоне  $\sim 10^9$  ч/см<sup>3</sup>. Работа поддержана грантом РФФИ 10-08-00886-а.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах под ред. В. В. Клюева. Том 2. Контроль герметичности (М., “Машиностроение”, 2003).
- [2] ITER, Final Design Report, 2001, G 31 DDD 14 01-07-19 W 0.1. section 3.1 “Vacuum Pumping and Fuelling Systems” (ITER, Cadareche, France, 2001).
- [3] K. Ioki and V. Chuanov, Convergence of Design and Fabrication Methods for ITER Vacuum Vessel and In-vessel Components, in: Proceedings of the 20th IAEA Fusion Energy, Vilamoura, Portugal, 2004 (Centro de Fusão Nuclear, Instituto Superior Técnico, Lisbon, 2004).
- [4] И. В. Визгалов, В. А. Курнаев, В. Н. Колесников и др., Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, N 3-4, 125 (2002).
- [5] Ю. П. Райзер, *Физика газового разряда* (М., Наука, 1992).
- [6] В. Н. Колесников, в: *Низкотемпературная плазма как объект диагностики*, ЭНТП, том 2 (изд. “Наука”, М., 2001), стр. 393.
- [7] Е. В. Фролов, Вакуумная техника и технология **12**(2), 99 (2002).

*По материалам 3 Всероссийской молодежной школы-семинара “Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики”, Москва, ФИАН, октябрь 2009 г.*

Поступила в редакцию 29 июля 2010 г.