

04;12

Технология для термоядерных реакторов, базирующиеся на инъекции макрочастиц

© Б.В. Кутеев

Санкт-Петербургский государственный технический университет, ТОО "Прикладная физика",
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 14 января 1999 г.)

Рассматриваются результаты, полученные при разработке для токамаков и стеллараторов различных технологий, базирующихся на инъекции в плазму макрочастиц. Инъекция макрочастиц используется в настоящее время для ввода топлива, диагностики плазмы, контроля горения, переключения режимов и подготовки первой стенки. Обсуждаются как физические проблемы, так и инженерные задачи, возникающие при развитии технологий, и последние результаты их приложений.

Инъекция водородных (топливных таблеток) и примесных макрочастиц широко используется в настоящее время в установках с магнитным удержанием плазмы, к которым относятся токамаки и стеллараторы, для разнообразных целей. Это позволяет говорить о возникновении новых технологий для термоядерных реакторов, базирующихся на инъекции макрочастиц.

Идея использовать небольшие кусочки твердого водорода, ускоренные до скорости в несколько километров в секунду, для ввода топлива в установку возникла в начале пятидесятых годов в рамках проведения стеллараторной программы. Такой способ рассматривался как альтернатива традиционному газовому напуску, который не позволяет решить проблему глубокого ввода топлива в реакторных условиях. Последующие эксперименты на токамаках и стеллараторах продемонстрировали высокую эффективность инъекции топливных таблеток для поддержания разряда в замкнутых магнитных конфигурациях. В настоящее время система инъекции топливных таблеток включена в проект Международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР) [1].

Использование макрочастиц для диагностики плазмы базировалось первоначально на сходстве процессов, протекающих при испарении макрочастиц в горячей плазме, и при инъекции в ионосферу бариевых облаков. Информация о параметрах плазмы и транспортных свойствах получалась на основе наблюдений за эволюцией облаков вблизи макрочастиц или эволюцией создаваемых макрочастицей возмущений концентрации и температуры. Для диагностических целей применяются как топливные, так и примесные макрочастицы.

Инъекцию литиевых макрочастиц начали использовать в последнее время для напыления защитного покрытия на первую стенку, препятствующего попаданию в плазму тяжелых примесей и уменьшающего таким образом эффективный заряд плазмы. Оказалось также, что в связи с возможностью реализации нескольких режимов горения разряда при одних и тех же внешних параметрах инъекция макрочастиц позволила производить переключения из одной моды в другую, что существенно расширяет возможности управления горением разряда.

Наконец, одна из критических задач быстрого аварийного выключения разряда в токамаках либо тушения плазмы перед возможным срывом может быть решена путем инъекции быстрой макрочастицы, состоящей из благородных газов.

Подробно проблемы инъекции макрочастиц в термоядерные установки обсуждаются в ряде обзоров и оригинальных работ [1–9]. В данном обзоре обсуждаются последние результаты. Особое внимание уделяется реакторным технологиям.

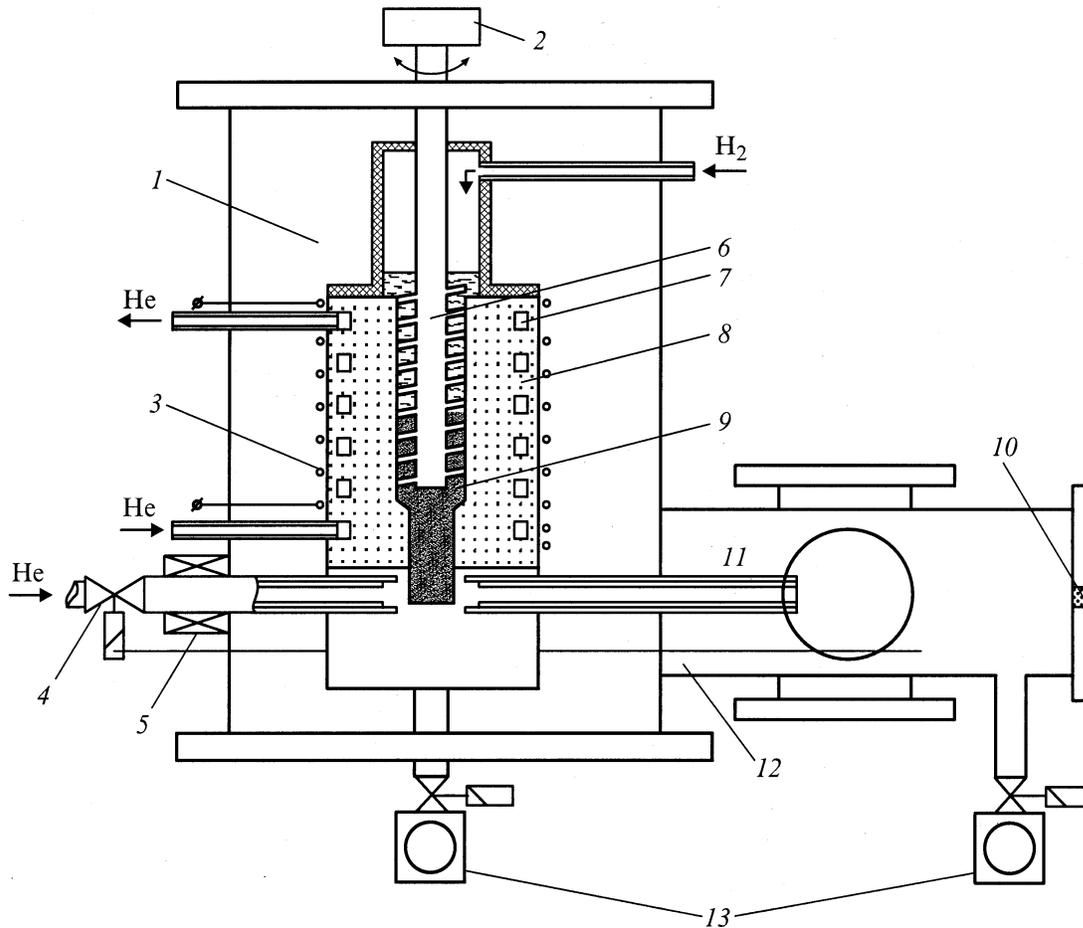
Ввод топлива

1. Основные параметры макрочастиц. В качестве примера в табл. 1 приводятся требования к системе инъекции топливных таблеток реактора ИТЭР [1]. Следует отметить, что практически все эти требования были реализованы по отдельности в экспериментах на существующих инжекторах.

2. Проникновение макрочастиц в плазму. Испарение макрочастиц в высокотемпературной плазме определяется потоком энергии, который достигает поверхности. При высоких скоростях испарения, характерных для водородных макрочастиц, этот поток формируется преимущественно высокоэнергетичным хвостом функции распределения электронов и в заметно меньшей мере поперечным потоком ионов.

Таблица 1. Требования к системе ввода топлива в ИТЭР

Параметр	Значение
Размер таблетки	8–10 mm
Скорость таблетки	0.6–1.5 km/s
Частота инъекции	1–100 Hz
Время инъекции	10 000 s
Максимальный расход (D_2)	100 Pa · m ³ s ⁻¹
Максимальный расход (T_2)	50 Pa · m ³ s ⁻¹
Допустимые потери массы таблетки	< 30%
Точность поддержания параметров	5% от величины
Время реакции	< 1 s



Блок-схема инжектора топливных таблеток со шнековым экструдером: 1 — вакуумная камера, 2 — мотор, 3 — нагреватель, 4 — клапан, 5 — электромагнитный привод, 6 — шнек, 7 — теплообменник, 8 — экструдер, 9 — твердый H_2 , 10 — микрофон, 11 — ствол, 12 — диагностическая камера, 13 — форнасосы.

Облако нейтралов, ответственное за экранирование поверхности от падающих тепловых потоков, сконцентрировано вблизи поверхности макрочастицы. Заметное влияние на испарение оказывает электростатический потенциал, возникающий на границе облака для компенсации разности электронного и ионного токов. Дополнительное экранирование связано с появлением вторичной плазмы и возмущениями магнитного поля движущимися плазменными потоками.

Развитые к настоящему времени модели достаточно хорошо описывают процессы испарения [5,6,10–12]. В качестве доказательства в табл. 2 представлены два теоретических и один экспериментальный скейлинг, полученный с использованием данных международной базы IPADBASE [7]. Видно, что зависимости скорости испарения от электронной концентрации n_e , электронной температуры T_e , и радиуса макрочастицы r_p находятся в хорошем соответствии друг с другом. Данный факт подтверждает существенное влияние нейтрального и электростатического экранирования на формирование скорости испарения. В таблице приведено сопоставление для условий, соответствующих максвелловской плазме и

отсутствию нагрева плазмы быстрыми ионами. Наличие в плазме быстрых электронов и ионов может существенно увеличить скорость испарения [12].

Скорость испарения чувствительна к величине объема плазмы, взаимодействующего с макрочастицей. В замкнутых плазменных конфигурациях этот объем имеет масштаб объема между двумя замкнутыми магнитными поверхностями с расстоянием между ними около радиуса макрочастицы. В открытых конфигурациях взаимодействующий с макрочастицей объем ограничен длиной силовой линии, так что он существенно меньше, чем в замкнутых конфигурациях. Это означает, что скорость

Таблица 2. Теоретические и экспериментальный скейлинг для скорости испарения водородных макрочастиц

Источник		Скорость испарения
Паркс	[10]	$\sim n_e^{0.33} T_e^{1.64} r_p^{1.33} M^{-0.33}$
Кутеев	[5]	$\sim n_e^{0.45} T_e^{1.72} r_p^{1.44} M^{-0.283}$
IPADBASE	[7]	$\sim n_e^{0.4} T_e^{1.72} r_p^{1.40}$

Таблица 3. Сравнительные характеристики формователей топливных таблеток

Формирователь	Трехпоршневой экструдер	Пористый формирователь	Шнековый экструдер
Испытанный диаметр таблетки	Не испытан (1–10 mm для одиночного экструдера)	2–3 mm	2 mm
Скорость экструзии	50 mm/s (одиночный экструдер)	–	20–50 mm/s
Время цикла в непрерывном режиме	Не получено (0.1 s с одиночным экструдером)	1 c	0.3 s (0.1 s — достижимо)
Время непрерывной работы	Не получено (7000 таблеток для одиночного экструдера)	60 min	60 min
Скорость	1.4 km/s	1.2 km/s	700 m/s
Тритиевая технология	Продемонстрирована	Не проверена	Не проверена
Запас трития	$20 \times 3 \text{ cm}^3$	$1 \times 10 \text{ cm}^3$	$\sim 10 \text{ cm}^3$
Надежность	Умеренная	Высокая	Высокая

Таблица 4. Ускорители макрочастиц

Ускоритель	Скорости	Проблемы
Центрифуга	$< 1.3 \text{ km/s}$	Трудности с размером более 2 mm, большой угол разлета таблеток, согласование формирователя и ускорителя
Одноступенчатая пушка	$< 1.5 \text{ km/s}$	Повышенная газовая нагрузка на вакуумную и тритиевую системы
Газодинамический ускоритель	$< 0.6 \text{ km/s}$	Высокая газовая нагрузка
Двуступенчатая пушка	$< 4.2 \text{ km/s}$	Разрушение поршня, очень высокая газовая нагрузка, проблемы с периодическим режимом
Рельсовый ускоритель	$< 2 \text{ km/s}$	Эрозия электродов

испарения в открытых системах может быть заметно меньше, чем в замкнутых.

3. Ф о р м и р о в а н и е м а к р о ч а с т и ц. В последние годы в непрерывном формировании топливных таблеток был достигнут существенный прогресс. На стендах было испытано несколько перспективных способов формирования. Многоэкструдерный способ [3] был предложен и развит в исследованиях СПбГТУ и Окриджской национальной лаборатории [13]. Эта технология использует несколько традиционных экструдеров, работающих последовательно. Два или три экструдера могут обеспечить непрерывный режим. В то время как один из экструдеров находится в рабочем режиме, другие заполняются топливом. Данная технология первоначально предлагалась для проекта ИТЭР [14].

Более прогрессивный способ был реализован СПбГТУ и ТОО "Прикладная физика" [15–17]. Это — так называемая шнековая экструзия водорода. Блок-схема, иллюстрирующая систему, приведена на рисунке. Водородный газ подается в специальный блок с вращающимся шнеком. Блок поддерживается при криогенных температурах (8–12 К). В верхней части экструдера газ конденсируется в жидкое, а затем и твердое состояние. Нижняя часть шнекового узла обеспечивает давление, достаточное для экструзии со скоростями до 50 mm/s.

Новая модификация технологии формирования макрочастиц прямо в стволе (in situ) была предложена

в работе [18]. Таблетки создаются внутри цилиндрической ячейки ствола, окруженной пористой вставкой, пропитанной твердым водородом и подсоединенной к системе подачи газа. Ячейка поддерживается при температуре около 10 К. После выстрела с помощью газа высокого давления ячейка нагревается до температуры, позволяющей твердому водороду проникать в ствол и формировать новую таблетку. Данный метод позволяет формировать таблетки с частотой около 1 Hz. Это позволяет надеяться на получение параметров ИТЭР при использовании системы с 10–20 стволами.

В табл. 3 сравниваются описанные выше способы непрерывного формирования таблеток. Ввиду отсутствия возвратно-поступательных движений и малого запаса топлива в формирователе системы использующие шнековую экструзию и пористые формирователи представляются более надежными, чем многоэкструдерные. В настоящее время проект ИТЭР ориентируется на шнековую экструзию как основной вариант инжектора топливных таблеток. Данная технология применима также и в действующих токамаках и стеллараторах, планирующих эксперименты с длинными импульсами. Прежде всего это относится к Tore-Supra и Large Helical Device.

4. У с к о р е н и е м а к р о ч а с т и ц. Для ускорения макрочастиц используются методы, представленные в табл. 4. К сожалению, существующие устройства не позволяют обеспечить скорости в диапазоне около 10 km/s,

которые необходимы для проникновения в центральные области установок масштаба ИТЭР. Тем не менее все способы ускорения позволяют таблеткам проникать за пределы так называемого диверторного слоя (SOL). Учитывая, что глубина проникновения является слабой функцией скорости макрочастицы ($\sim v_p^{1/3}$), все методы, приведенные в табл. 4, могут конкурировать друг с другом с точки зрения скорости. В таких условиях наиболее существенными параметрами технологии становятся надежность, простота, ресурс и малая нагрузка на систему откачки. В таблице методы приведены в порядке, соответствующем их применимости в реакторе. Там же приведены некоторые присущие им и до сих пор не решенные проблемы.

5. Р а з м е щ е н и е с и с т е м ы н а у с т а н о в к е. Обычно таблетки инжектируются в плазму со стороны магнитного поля (с внешней стороны). В последнее время были проведены эксперименты по инъекции таблеток со стороны сильного магнитного поля сверху или снизу установки. Это было сделано с целью найти оптимальную геометрию инъекции с точки зрения глубины проникновения и эффективности ввода топлива [19]. Под эффективностью понимается процент захваченных плазмой частиц по отношению к инжектированным (см., например, [20]). Обычно эффективность растет с глубиной проникновения. Поиск оптимального направления инъекции, очевидно, будет продолжен в ближайшие годы.

Диагностика

Для диагностики плазмы используются как водородные, так и примесные макрочастицы [4]. Примесные макрочастицы обычно ускоряются в газодинамических инжекторах [21]. Типичные скорости макрочастиц лежат в диапазоне 100–600 м/с. Размер электронов в полностью ионизованном материале макрочастицы не превышает 30% от общего числа электронов в установке. Это соответствует диаметру примесных макрочастиц 0.3–0.6 мм.

Возможности диагностики параметров плазмы основаны на наблюдениях за параметрами облаков вблизи испаряющихся макрочастиц [22,23], траекторией движения [24], измерениях скорости испарения [4]. Поскольку облака вытянуты в направлении магнитного поля, то, используя скоростное фотографирование облаков, можно определять направление магнитного поля в различных точках траектории макрочастицы. Недавние эксперименты на токамаке ASDEX-Upgrade показали возможность существенного уточнения информации о центральных значениях запаса устойчивости с использованием данного метода.

Дрейф плазмы в полоидальном направлении приводит к асимметричной форме облаков. Наблюдения за такой асимметрией в линиях различных ионов позволяет оценивать значения радиального электрического поля в плазме — важного параметра, ответственного за

транспортные свойства плазмы и тип режима удержания энергии. Данная методика успешно использовалась на токамаках ФТ-1 и Т-10. Были обнаружены скорости дрейфа плазмы в диапазоне скоростей 10^5 – 10^6 см/с.

В токамаках траектории макрочастиц оказываются изогнутыми вследствие ускорения макрочастиц в тороидальном направлении под воздействием плазменного тока. Кривизна траектории оказывается пропорциональной величине локальной плотности тока, что позволяет осуществлять ее измерения. В частности, такие измерения были проведены в режимах с генерацией тока электронного циклотронного резонанса [24].

Скорость испарения несет в себе информацию о локализации магнитных островов и пучков быстрых частиц. В местах расположения островов она уменьшается вследствие уменьшения объема плазмы, участвующего в испарении. В области пучков скорость испарения заметно возрастает. Существенно, что пространственное разрешение метода макрочастиц определяет размер последних, что существенно превосходит другие способы диагностики.

При инъекции макрочастиц создаются возмущения электронной плотности, температуры, что позволяет исследовать транспортные явления в плазме [25]. Инъекция примесей дает информацию об их переносе.

Недавно перезарядка альфа-частиц на облаках, окружающей литиевую макрочастицу, была успешно использована для определения их параметров в токамаке TFTR [26]. Этот метод остается уникальным способом определения пространственного и энергетического распределения альфа-частиц.

Таблетки-терминаторы

Для быстрого охлаждения плазмы и вывода тока в случае аварийной ситуации и опасности большого срыва было предложено инжектировать в плазму макрочастицы размером 1–10 см, состоящие из дейтерия или благородных газов [4,9,27,28]. Многочисленные эксперименты продемонстрировали высокую эффективность данной технологии в Т-10, JT-60, ASDEX-Upgrade, DIII-D. Инжекторы таблеток-терминаторов включены в проект ИТЭР. В настоящее время для инъекции таких таблеток используются существующие инжекторы водородных макрочастиц, в которые вводятся благородные газы. Для инъекции твердых веществ с большим зарядом ядра (KCl, SiC, Ti) применяются специально разработанные инжекторы на основе легкогазовых пушек.

Подготовка первой стенки

Борьба за чистоту плазмы в замкнутых плазменных конфигурациях привела к выводу о том, что материалы с малым зарядом ядра являются наилучшим решением для первой стенки. Даже монослой лития, бериллия или бора может существенно уменьшить потоки примесей и

эффективный заряд плазмы. Инжектированные в плазму примесные макрочастицы, испаряясь, создают источник атомов, однородно покрывающий стенку защитным слоем с низким зарядом ядер. Эксперименты с инъекцией лития дали заметное улучшение параметров плазмы в токамаке TFTR [29,30].

Переключение режимов

Переключение разряда из *L*- в *H*-моду и обратно, улучшение энергоудержания и контроль профиля плотности с помощью инъекции макрочастиц были успешно продемонстрированы в многочисленных экспериментах на токамаках [31–33]. Так, на токамаке TFTR инъекция макрочастиц обеспечивала временный перевод разряда из *L*- в *H*-моду. Обратный переход был получен при периферийной инъекции дейтерид-литиевых таблеток в омических режимах токамака Туман-3. Периферийная инъекция водородных таблеток в токамак Т-10 в режиме с мощным электронным циклотронным нагревом также вызывала переход в *H*-моду. На токамаке ASDEX-Urgade отмечалось стимулирование таблетками периферийной неустойчивости (так называемой ELM).

Заключение

Технологии для термоядерного реактора, базирующиеся на инъекции в плазму макрочастиц, успешно развиваются в настоящее время и широко используются в современных экспериментах на токамаках и стеллараторах. Они позволяют осуществлять внутренний ввод топлива в установки, проводить измерения параметров плазмы, переключать режимы горения разряда, быстро выключать плазму и выводить ток в аварийных ситуациях, кондиционировать первую стенку камеры установок. Технические характеристики систем инъекции уже в настоящее время близки к необходимым для работы в реакторных условиях. Очевидно, что данные технологии будут играть существенную роль в обеспечении работы будущего термоядерного реактора.

Список литературы

- [1] Milora S.L., Houlberg W.A., Lengyel L.L., Mertens V. // Nucl. Fusion. 1995. Vol. 35. P. 657.
- [2] Combs S.K. // Rev. Sci. Instrum. 1993. Vol. 64. P. 1679.
- [3] Kuteev B.V., Umov A.P., Viniar I.V. et al. // Plasma Devices and Operations. 1994. Vol. 2. P. 193.
- [4] Kuteev B.V. et al. // Fusion Technology 1994. Vol. 26. P. 938.
- [5] Kuteev B.V. // Nucl. Fusion. 1995. Vol. 35. P. 431.
- [6] Garzotti L., Pegourie B., Geraud A. et al. // Nucl. Fusion. 1997. Vol. 37. P. 1167.
- [7] Baylor L.R., Geraud A., Houlberg W.A. et al. // Nucl. Fusion. 1997. Vol. 37. P. 445.
- [8] Nakamura H., and ITER JCT. // Fuelling. Detail Design Description. ITER. Garching, 1997.
- [9] Yoshino R., Kondoh T., Neyatani Y. et al. // Plasma Phys. Control. Fusion. 1997. Vol. 39. P. 313.
- [10] Parks P.B., Turnbull R.J. // Phys. Fluids. 1978. Vol. 21. P. 1735.
- [11] Houlberg W.A., Milora S.L., Attenberger S.E. // Nucl. Fusion. 1988. Vol. 28. P. 595.
- [12] Kuteev B.V., Kostrukov A.Yu. // Europhys. Conf. Abstracts. 1995. Vol. 19C. Pt. 1. P. 1–121.
- [13] Combs S.K., Milora S.L., Baylor L.R. et al. // Fusion Technology. 1996. P. 1153.
- [14] Gouge M.J., Combs S.A., Fisher P.W. et al. // ITER Plasma Fueling Development. MJG-ITER 3-97.
- [15] Skoblikov S.V., Koblents P.Yu. // Techn. Phys. Lett. (in Russian). 1997. Vol. 43. N 23.
- [16] Viniar I.V., Skoblikov S.V., Koblents P.Yu. et al. // Fusion Technology / Ed. Varandas, F. Serra. 1996. P. 1137; Винаяр И.В., Скобликов С.В., Кобленц П.Ю. // ЖТФ. 1998. Т. 68. С. 117.
- [17] Viniar I.V., Sudo S., Skoblikov S.V. et al. // J. of Plasma. and Fus. Res. Series, Helical System Research. 1998. Vol. 1. P. 414.
- [18] Viniar I.V., Sudo S. // Rev. Sci. Instr. 1997. Vol. 68. P. 1444.
- [19] Lang P.T., Buechl K., Kaufmann M. et al. // Europhys. Conf. Abstracts. 1997. Vol. 21A. P. 1481.
- [20] Baylor L.R., Jernigan T.C., Carstrom T. et al. // Europhys. Conf. Abstracts. 1995. Vol. 19C. Part 1. P. 1–113.
- [21] Lang P.T., Cierpka P., Egorov S.M. et al. // Fusion Technology. 1995. Vol. 27. P. 653.
- [22] Mueller H.W., Lang P.T., Buechl K. et al. // Rev. Sci. Instr. 1997. Vol. 68. P. 4051.
- [23] Sergeev V.Yu., Kostrukov A.Yu., Shibaev S.A. // Fusion Eng. And Design. 1997. Vol. 34–35. P. 323.
- [24] Sergeev V.Yu., Polivaev D.A. // Fusion Eng. And Design. 1997. Vol. 34–35. P. 215.
- [25] Mantica P., De Baar M.R., de Kloe J. et al. // Europhys. Conf. Abstracts. 1997. Vol. 21A. P. 1853.
- [26] Redi M.H., Batha S.H., Budny R.V. et al. // Europhys. Conf. Abstracts. 1997. Vol. 21A. P. 1069.
- [27] Kuteev B.V., Sergeev V.Yu., Sudo S. // Nucl. Fusion. 1995. Vol. 35. P. 1167.
- [28] Sergeev V.Yu., Kuteev B.V., Kalmykov S.G. et al. // Europhys. Conf. Abstracts. 1995. Vol. 19C. Part 3. P. IV-057.
- [29] Strachan J.D., Bell M., Bitter M. et al. // Nucl. Fusion. 1993. Vol. 33. P. 991.
- [30] Kondo K. et al. // J. Nucl. Materials. 1997. Vol. 241–243. P. 956.
- [31] Askinazi L.G., Golant V.E., Lebedev S.V. et al. // Phys. Fluids. 1993. Vol. B5. P. 2420.
- [32] Kapralov V.G., Khlopenkov K.V., Rozhansky V.A. // Tech. Phys. Lett. 1995. Vol. 21. P. 57.
- [33] Kapralov V.G., Rozhansky V.A., Khlopenkov K.V. // Europhys. Conf. Abstracts. 1995. Vol. 19C. Pt. 1. P. 1–117.