

On the Implementation of the Mechanism of Radiation Compression in a Z-pinch

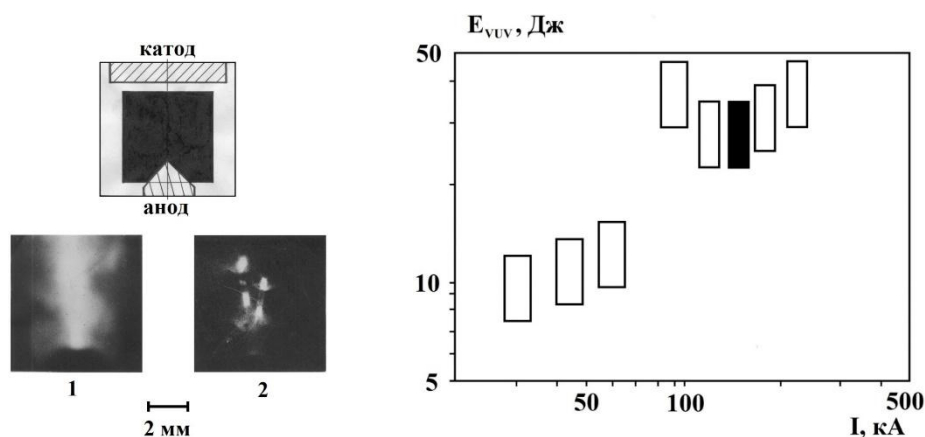
A.N. Dolgov, D.E. Prokhorovich

*Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA),
Moscow, 127055, Russia
vniia@vniia.ru*

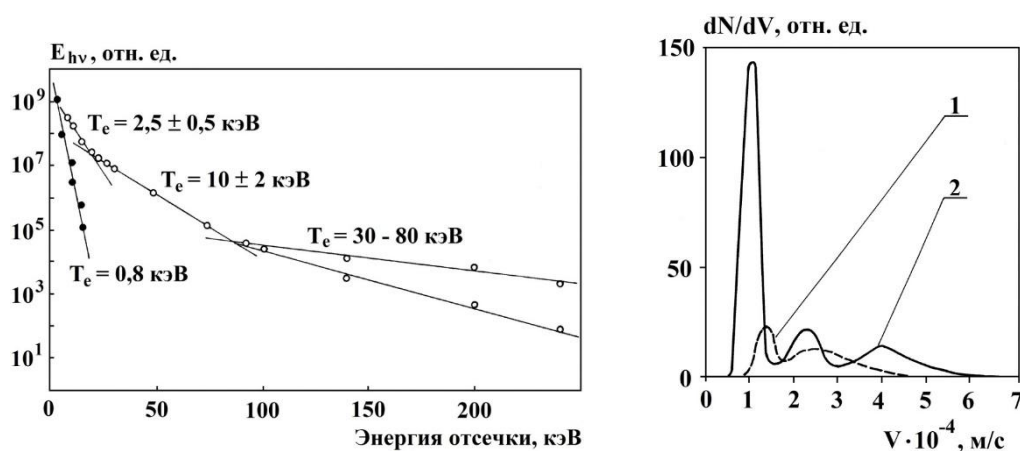
Abstract

The results of experimental studies showing the benefit of implementing the mechanism of radiation compression in Z-pinch in a medium heavy elements in excess of the critical current value.

Keywords: Z-pinch, radiation compression, experiment



Images of the plasma discharge, resulting in a range $h\nu > 1$ кэВ by X-ray pinhole camera in the mode: 1 – subcritical $I_{\max} < I_{\text{crit}}$ и 2 – supercritical $I_{\max} > I_{\text{crit}}$ (from the left). The dependence of the absolute output power short-wave radiation in the range of $10 \text{ эВ} < h\nu < 100 \text{ эВ}$ from the plasma discharge of the value achieved in the discharge current (from the right).



The spectrum of bremsstrahlung micropinch discharge plasma iron. Dark points correspond subcritical state of the discharge $I_{\max} < I_{\text{crit}}$, light – supercritical regime $I_{\max} > I_{\text{crit}}$ (from the left). The range of ion emission from a plasma discharge micropinch 1 – to critical mode $I_{\max} < I_{\text{crit}}$ и 2 – in the supercritical mode $I_{\max} > I_{\text{crit}}$, recorded along the axis of the discharge (from the right).

УДК 533.9

О реализации механизма радиационного сжатия в Z-пинче

А.Н. Долгов, Д.Е. Прохорович

*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»,
Российская Федерация, Москва, 127055, ул. Суцёвская, д.22
vniia@vniia.ru*

Аннотация

В работе представлены результаты экспериментальных исследований, свидетельствующие в пользу реализации механизма радиационного сжатия в Z-пинчах в среде тяжелых элементов при превышении критической величины тока.

Ключевые слова: Z-пинч, радиационное сжатие, эксперимент.

1. Гипотеза радиационного сжатия в Z-пинче

Впервые баланс энергии, выделяемой током в плазме пинчующегося разряда, и энергии, уносимой излучением, была рассмотрена Пизом [1] и Брагинским [2]. Впоследствии этот вопрос изучался в ряде работ [3–11]. Пиз и Брагинский, моделируя процессы в Z-пинче, рассматривали баланс выделяющегося в водородной плазме джоулево тепла и ухода энергии с потоком тормозного излучения и в результате обнаружили существование критического значения силы разрядного тока, которое в дальнейшем получило наименование тока Пиза – Брагинского. При силе тока в разряде, превышающей ток Пиза – Брагинского, энергия, уносимая излучением, превышает джоулево выделение тепла. Недостающая энергия черпается из внутренней энергии плазмы, приобретаемой при её сжатии магнитным полем. Таким образом, пинч приобретает способность неограниченно сжиматься (коллапсировать) по крайней мере до тех пор, пока для его описания применимо приближение статистики Больцмана [12]. Сжатие пинча за счёт охлаждения плазмы посредством излучения называют радиационным коллапсом.

Если принимать во внимание только тормозное излучение, т.е. ограничиваться рассмотрением плазмы изотопов водорода, то одна из трудностей на пути реализации радиационного коллапса состоит в адиабатичности ионов в силу того, что отвод энергии от подсистемы ионов происходит медленнее, чем от электронов. Если же плазма разряда образована тяжёлыми элементами, то появляется дополнительный канал отвода энергии от ионов – линейчатое излучение [7].

История практического исследования сильноизлучающей плазмы Z-пинча началась с обнаружения в низкоиндуктивной вакуумной искре «горячей точки» – объекта размерами менее 50 мкм, интенсивно излучающего в рентгеновском диапазоне спектра линии ионов высокой кратности и существующего во времени менее 50 нс [13]. Измерения температуры и электронной плотности, выполненные методами рентгеновской дифракционной спектроскопии высокого разрешения, дали значения этих параметров в интервале $3 \div 10$ кэВ и $1020 \div 1023$ см⁻³ [14–20]. Экспериментальное изучение динамики пространственной структуры и рентгеновского излучения плазмы тяжёлых элементов в Z-пинче показало, что наблюдаемое методами оптической тенеграфии с импульсным лазерным осветителем максимальное сжатие перетяжки плазменного столба в разряде до радиуса порядка 100 мкм

опережает по времени на $30 \div 50$ нс момент достижения минимума в так называемой «особенности» тока и вспышки излучения многозарядных ионов. Обнаружено, что перетяжка и область формирования «горячей точки» пространственно совпадают [21, 22].

На основе сравнительного анализа результатов модельных расчётов, выполненных для Z-пинча в среде тяжёлых элементов [7], и результатов эксперимента была выдвинута гипотеза о том, что сжатие плазмы в перетяжке происходит в две стадии. Первая – относительно медленная – фиксируется на тенеграмме, определяющим фактором для её протекания является вынос вещества из области сжатия, и заканчивается она при достижении радиуса перетяжки около 100 мкм. Вторая – более быстрая – не фиксируется на тенеграммах, запаздывает по отношению к первой на $30 \div 50$ нс, обусловлена радиационными потерями энергии, т.е. является радиационным сжатием, и заканчивается формированием «горячей точки» [23]. Отметим, что объект, называемый «горячей точкой», появляется во всех типах сильноточных разрядов с пинчуемой плазмой в присутствии тяжелых элементов: плазменном фокусе [24, 25]; взрывающихся проводниках различных конфигураций (проволочка, сборки, X-пинч, лайнер) [26–28]; разрядах в сверхзвуковой струе инжектируемого в вакуум газа [29, 30]; каналированном сильноточном разряде в газе высокого давления [31]. Поэтому «горячую точку» также принято называть микропинчем.

2. Экспериментальные свидетельства реализации механизма радиационного сжатия

Получить убедительные свидетельства реализации радиационного сжатия можно путём сравнения предсказаний верифицированной теоретической модели с результатами экспериментальных исследований. Из большого числа разновидностей сильноточных пинчевых разрядов мы подробно остановимся на изучении свойств низкоиндуктивной вакуумной искры. Во-первых, потому, что явление микропинчевания в разряде данного вида изучено наиболее тщательно благодаря, не в последнюю очередь, относительной простоте разрядного устройства. Во-вторых, радиационный коллапс проявляется здесь, по-видимому, в наиболее чистом виде. Стоит при этом отметить, что, несмотря на достижение в системах с плазменным фокусом и взрывающимися проводниками токов $1 \div 20$ МА, нет сообщений о достижении в них более высоких температур и плотностей плазмы по сравнению с низкоиндуктивной вакуумной искрой. В третьих, авторы получают возможность опереться на результаты собственных исследований.

Схема типичной установки неоднократно описывалась в литературе (смотри, например [21, 22]). Искровой разряд в вакуумном промежутке $6 \div 8$ мм между соосными электродами, один из которых (обычно анод) – конический, другой (обычно катод) – плоский, инициируется дополнительным разрядом эрозионного типа малой энергии. Давление остаточных газов в вакуумной камере не более $10 \div 4$ Тор. Максимальный ток в разряде до 300 кА достигается за время $1 \div 2$ мкс от момента инициации. Источник тока – батарея низкоиндуктивных высоковольтных конденсаторов, зарядное напряжение батареи – до 30 кВ. Рабочая среда разряда – продукты эрозии электродов (в наших экспериментах главным образом железо).

Изучение пространственной структуры плазмы разряда дало следующие результаты. Изображения в рентгеновском диапазоне спектра собственного излучения плазмы, полученные с помощью камеры-обскуры интегрально по времени, обнаруживают пороговый эффект по достигаемой в разряде силе тока. При $I_{\max} < I_{\text{crit}}$, где $I_{\text{crit}} \approx 50$ кА, в спектральном диапазоне $h\nu > 1$ кэВ наблюдается образование источника излучения радиусом ~ 1 мм и длиной, равной длине разрядного промежутка (рис. 1), который по результатам импульсной тенеграфии с лазерным осветителем (длительность высвечивания лазерного импульса – 6 нс) можно идентифицировать со столбом плазмы разряда на стадии максимального сжатия. Формирования «горячих точек» при этом не происходит. Если же достигаемый в разряде

ток превышает критический, то в спектральном диапазоне $h\nu > 1 \text{ кэВ}$ и на тенеграммах наблюдается формирование перетяжки радиусом $\sim 100 \text{ мкм}$ (соответствующие изображения на обскурограмме и тенеграмме пространственно совпадают). В диапазоне $h\nu > 3 \text{ кэВ}$ в области перетяжки наблюдаются «горячие точки» размером не более 10 мкм [32–34]. Все приведённые экспериментальные данные находятся в полном соответствии с результатами модельных расчетов, выполненных именно для плазмы железа [7].

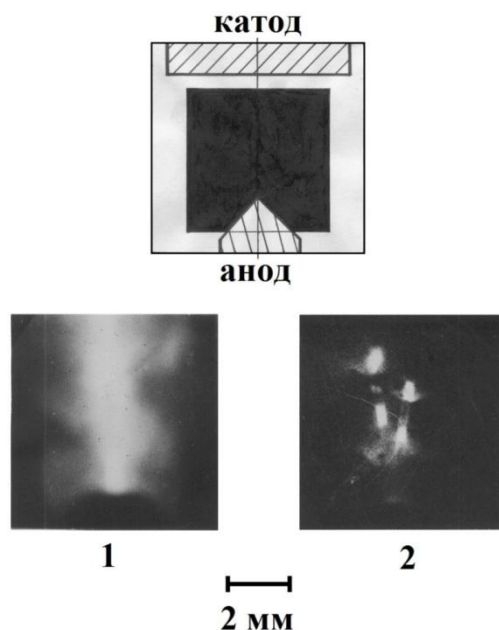


Рис. 1. Изображения плазмы разряда, полученные в диапазоне $h\nu > 1 \text{ кэВ}$ с помощью рентгеновской камеры-обскуры, в режиме: 1 – докритическом $I_{\text{max}} < I_{\text{crit}}$ и 2 – сверхкритическом $I_{\text{max}} > I_{\text{crit}}$

Абсолютные измерения выхода лучистой энергии из плазмы разряда демонстрируют скачкообразное увеличение выхода коротковолнового излучения в диапазоне вакуумного ультрафиолета $10 \text{ эВ} < h\nu < 100 \text{ эВ}$ и мягкого рентгена $h\nu > 100 \text{ эВ}$ при переходе от докритического режима к сверхкритическому (рис. 2).

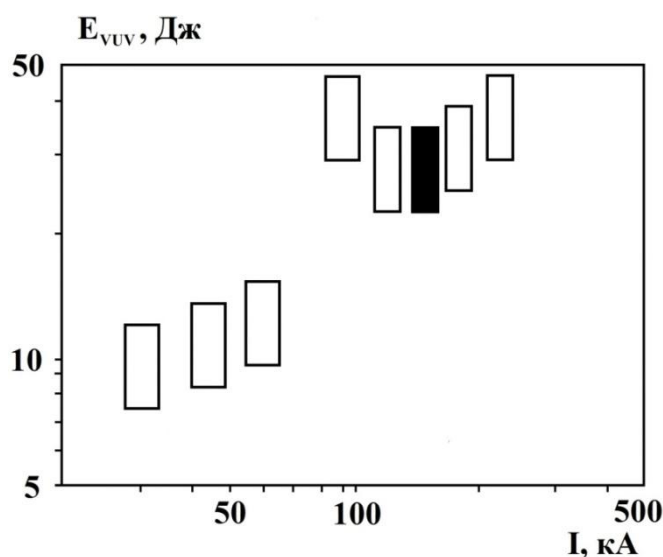


Рис. 2. Зависимость абсолютного выхода энергии коротковолнового излучения в диапазоне $10 \text{ эВ} < h\nu < 100 \text{ эВ}$ из плазмы разряда от величины достигаемой в разряде силы тока. Выделена экспериментальная точка, соответствующая $I_{\text{max}} = 150 \text{ кА}$

Оценки излучательных характеристик плазмы микропинчевого разряда, проведённые на основе модельных представлений при фиксированной величине достигаемой силы тока $I_{\max} = 150 \text{ кА}$ показали, что расчётные параметры плазмы разряда в рамках модели радиационного сжатия вполне согласуются с результатами измерений энергии коротковолнового излучения [35]. Авторы [36], основываясь на представлениях модели радиационного сжатия, сформулировали задачу описания динамики микропинча, допускающую аналитическое решение, и вывели соотношения, связывающие между собой основные параметры плазмы и величину тока в разряде. Используя эти соотношения, удалось получить выражения для теоретической зависимости энергии мягкого рентгеновского излучения микропинчевого разряда и достигаемой электронной температуры микропинча от величины силы тока в разряде. В обоих случаях экспериментально наблюдаемые зависимости полностью совпали с теоретически ожидаемыми (рис. 3, 4). Электронная температура в эксперименте определялась по кривым поглощения в спектральном диапазоне $1 \text{ кэВ} < h\nu < 5 \text{ кэВ}$ [35].

Измерения электронной температуры плазмы в перетяжке с высоким пространственным разрешением подтвердили двустадийность процесса формирования микропинча. При достигаемой силе тока 150 кА зафиксированы источники рентгеновского излучения в диапазоне энергий квантов $h\nu > 1 \text{ кэВ}$ двух типов, характерные размеры и температуры которых составляют $\leq 5 \text{ мкм}$ и $\sim 2 \text{ кэВ}$, $\sim 150 \text{ мкм}$, $\leq 1 \text{ кэВ}$, соответственно. Первые, по-видимому, собственно микропинчи; вторые – результат перегрева плазмы в перетяжке на стадии перехода от первого сжатия ко второму (радиационному) сжатию [34]. Данный вывод согласуется с результатами измерений электронной температуры плазмы микропинчевого разряда, выполненными с наносекундным временным разрешением [37, 38] при помощи многоканального сцинтилляционного детектора рентгеновского излучения. Результаты измерений температуры свидетельствуют о разогреве и нарастающей неравновесности пинчуемой плазмы в процессе перехода от первого ко второму сжатию. Зарегистрированная длительность переходного процесса составляет 50 нс и совпадает с длительностью двойной вспышки оптического излучения на оси разряда в момент достижения максимума тока, зафиксированной с помощью фотохронографа при непрерывной регистрации излучения в режиме лупы времени с пространственным разрешением в поперечном по отношению к оси разряда направлении [39]. В тоже время имеющиеся в литературе данные показывают, что излучение микропинчевого разряда в оптическом диапазоне хорошо коррелирует с излучением в рентгеновском диапазоне [40]. Выше приведенные экспериментальные результаты и их интерпретация полностью соответствуют результатам исследований параметров плазмы микропинча, выполненных с пикосекундным временным разрешением методами рентгеновской дифракционной спектроскопии [41].

Переход от докритического режима разряда к сверхкритическому сопровождается качественным изменением характера спектра тормозного рентгеновского излучения, измеряемого интегрально по времени в диапазоне энергий квантов от 2 кэВ до 300 кэВ [42, 43] (рис. 5). В докритическом режиме спектр излучения соответствует излучению плазмы с электронной температурой 0.8 кэВ . В сверхкритическом режиме (достигаемый ток разряда 150 кА) в диапазоне энергий квантов $2 \text{ кэВ} < h\nu < 20 \text{ кэВ}$ спектр излучения соответствует температуре $2 \div 3 \text{ кэВ}$, что совпадает с предсказываемой модельными расчётами электронной температурой микропинча. В диапазоне энергий квантов $20 \text{ кэВ} < h\nu < 100 \text{ кэВ}$ спектр излучения соответствует температуре $8 \div 12 \text{ кэВ}$, что совпадает с предсказываемой температурой плазмы в перетяжке на стадии распада микропинча в результате развития аномального сопротивления [44]. В диапазоне энергий квантов $h\nu > 100 \text{ кэВ}$ спектр отражает развитие ускорительных процессов в перетяжке и вполне объясним в рамках модели радиационного сжатия [41, 45].

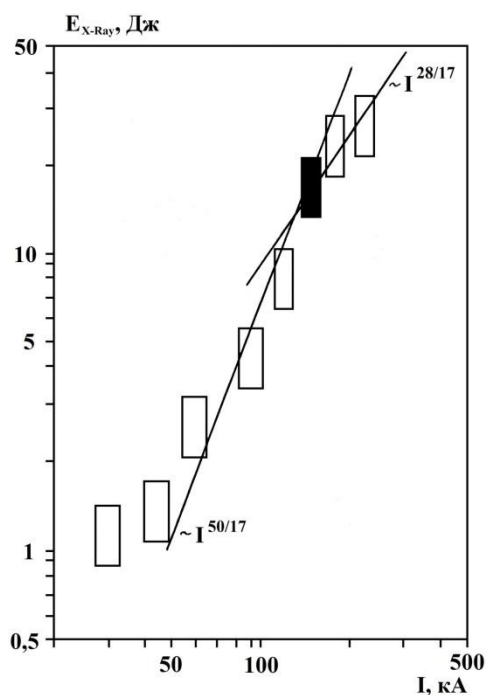


Рис. 3 Зависимость абсолютного выхода мягкого рентгеновского излучения $h\nu > 100$ эВ из плазмы разряда от величины достигаемой в разряде силы тока. Выделена экспериментальная точка, соответствующая $I_{\max} = 150$ кА. Указаны модельные зависимости, отвечающие равенству времени высвечивания: $I^{50/17}$ – времени жизни микропинча и $I^{28/17}$ – времени сжатия микропинча, определяемого альфвеновской скоростью

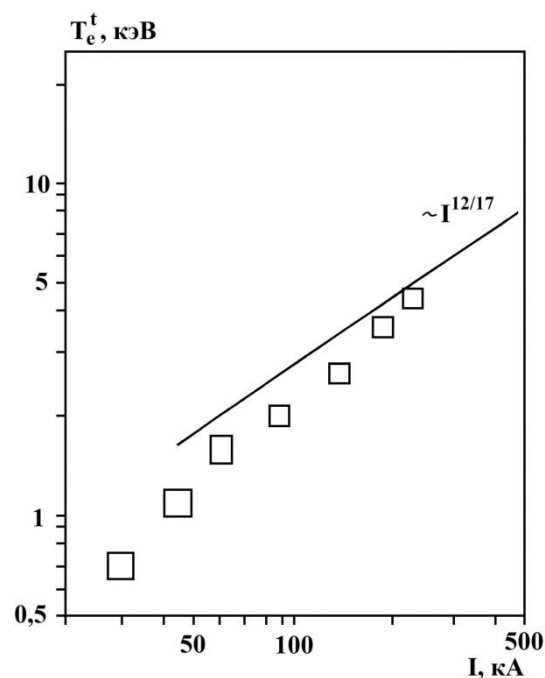


Рис. 4. Зависимость регистрируемой по спаду тормозного континуума в рентгеновском диапазоне спектра $1 \text{ кэВ} < h\nu < 5 \text{ кэВ}$ электронной температуры микропинча от величины достигаемой в разряде силы тока. $I^{12/17}$ – теоретическая зависимость, полученная в рамках модели радиационного сжатия

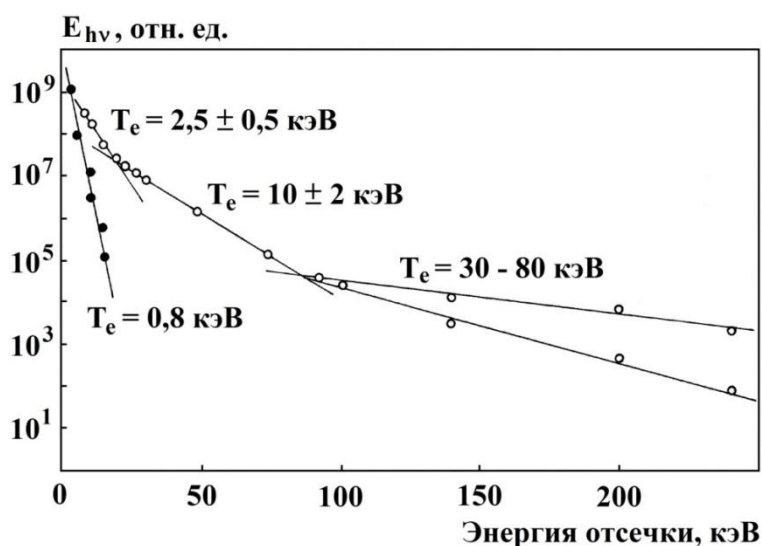


Рис. 5. Спектр тормозного рентгеновского излучения микропинчового разряда в плазме железа. Темные точки соответствуют докритическому режиму горения разряда $I_{\max} < I_{\text{crit}}$, светлые – сверхкритическому режиму $I_{\max} > I_{\text{crit}}$

Прямая регистрация электронной эмиссии из плазмы низкоиндуктивной вакуумной искры в диапазоне энергий частиц $10 \div 450$ кэВ [46] показала, что при переходе от докри-

тического режима разряда к сверхкритическому происходит резкое изменение спектра электронов (рис. 6), в частности, спектр становится значительно более высокоэнергетичным – на порядок возрастает максимальная энергия регистрируемых частиц.

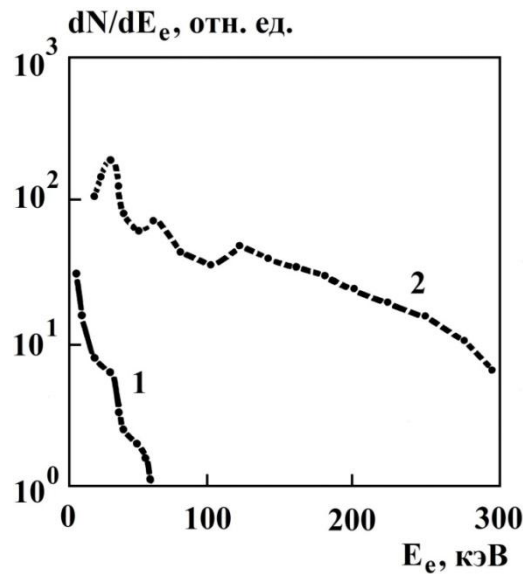


Рис. 6. Спектр электронной эмиссии из плазмы микропинцевого разряда: 1 – в докритическом режиме $I_{\max} < I_{\text{crit}}$ и 2 – в сверхкритическом режиме $I_{\max} > I_{\text{crit}}$, регистрируемой вдоль оси разряда

В спектре ионной эмиссии наблюдаются устойчивые группы частиц, которые испускаются на различных стадиях развития разряда. Исследование спектра частиц с различной кратностью ионизации продемонстрировало, что механизм формирования спектра – пинчевание плазмы в перетяжке [47]. Переход в сверхкритический режим отмечается появлением частиц со скоростями свыше 4×10^4 м/с (рис. 7).

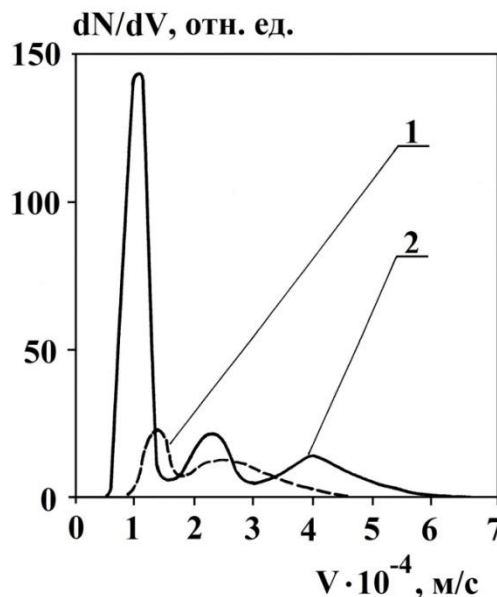


Рис. 7. Спектр ионной эмиссии из плазмы микропинцевого разряда: 1 – в докритическом режиме $I_{\max} < I_{\text{crit}}$ и 2 – в сверхкритическом режиме $I_{\max} > I_{\text{crit}}$, регистрируемой вдоль оси разряда

Корреляция выхода энергии рентгеновского излучения L-ионов и ионных спектров в области скоростей ионов свыше 4×10^4 м/с свидетельствует о том, что появление соответ-

ствующих ионов связано с переходом процесса пинчевания в режим радиационного сжатия [48]. Энергия частиц, наблюдаемых в спектре выделенных групп, хорошо просчитывается исходя из модели радиационного сжатия [49], в частности, присутствие групп частиц с энергиями $2 \div 3$ кэВ (температура микропинча), $10 \div 12$ кэВ (температура плазмы в перетяжке на стадии распада микропинча), $30 \div 50$ кэВ (энергия частиц, выбрасываемых вдоль оси разряда из области формирования микропинча) связано с образованием «горячей точки».

В экспериментах по регистрации спектра рентгеновского излучения микропинчевого разряда методами дифракционной спектроскопии внимание уделяется главным образом линиям ионов наиболее высоких кратностей ионизации: водородо-, гелие- и литиеподобных ионов, т.к. в спектре излучения удаётся восстановить профили соответствующих линий для дальнейшего анализа с целью получения информации о плотности, температуре и ионизационном состоянии плазмы [25, 28, 50]. Авторы попытались сделать более заметным вклад в спектр рентгеновского излучения ионов меньших зарядностей, провоцируя развитие ускорительных процессов для электронной компоненты плазмы. Оказалось, что, уменьшая угол раствора конической поверхности внутреннего электрода и увеличивая тем самым скорость истечения плазмы из перетяжки, удаётся стимулировать ускорение электронов, по-видимому, в квазистатическом электрическом поле резистивной природы при переходе от первой стадии сжатия ко второй его стадии [51]. В К-спектре железа, зарегистрированном с помощью фокусирующего кристаллического спектрографа (рис. 8), наблюдается в этом случае резкое различие вклада в спектр излучения линий L-ионов FeXVIII – FeXIX и FeXX – FeXXII, несмотря на то обстоятельство, что потенциалы ионизации ионов FeXVIII – FeXXII различаются незначительно [52]. Данное обстоятельство хорошо поддаётся объяснению в рамках модельных расчётов для радиационного сжатия [7]. Ионы FeXVIII – FeXIX преобладают в микропинче на стадии завершения радиационного сжатия, в дальнейшем благодаря росту температуры [42] продолжается рост зарядности ионов в перетяжке на фоне быстрого падения плотности плазмы и, соответственно, падения эффективности возбуждения линейчатого излучения потоком надтепловых электронов.

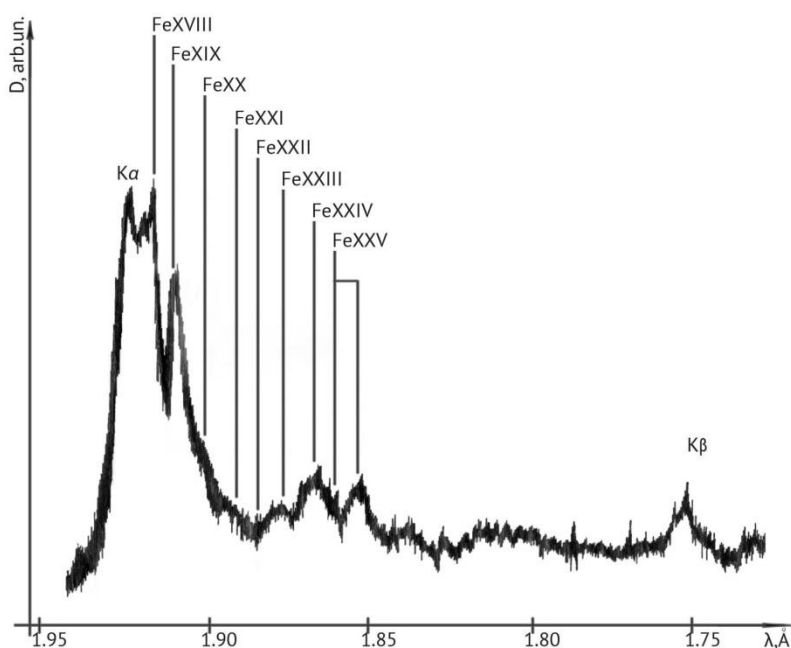


Рис. 8. Денситограмма К-спектра излучения микропинчевого разряда в плазме железа, полученная методами дифракционной спектроскопии

Таким образом, совокупность представленных результатов экспериментальных исследований не противоречит модели радиационного коллапса и свидетельствует в пользу реализации указанного механизма в сильноточных Z-пинчевых разрядах в среде тяжелых элементов.

3. Заключение

Получить убедительные свидетельства реализации радиационного сжатия можно путём сравнения предсказаний теоретической модели с результатами экспериментальных исследований, чему и посвящена данная работа. Изображения в рентгеновском диапазоне спектра собственного излучения плазмы, полученные с помощью камеры-обскуры интегрально по времени, обнаруживают пороговый эффект глубины сжатия плазмы пинча от достигаемой в разряде силы тока. Экспериментально определенная величина критического тока совпадает с результатами теоретических расчетов. Абсолютные измерения выхода лучистой энергии из плазмы разряда демонстрируют скачкообразное увеличение выхода коротковолнового излучения в диапазоне вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена при переходе от докритического режима к сверхкритическому. Измерения электронной температуры плазмы в перетяжке с высоким пространственным разрешением и непрерывная регистрация плазмы разряда в видимом диапазоне спектра подтвердили двустадийность процесса формирования микропинча с временным интервалом между сжатиями в несколько десятков наносекунд. Зарегистрировано качественное изменение характера спектра тормозного рентгеновского излучения, спектра электронной и ионной эмиссии, обнаружена поляризация рентгеновского излучения при превышении критической величины тока в разряде. Совокупность представленных результатов экспериментальных исследований свидетельствует в пользу реализации механизма радиационного сжатия в сильноточных Z-пинчевых разрядах в среде тяжелых элементов.

Литература

1. Pease R.S. Equilibrium characteristics of a pinched gas discharge cooled by bremsstrahlung radiation. // Proc. Phys. Soc. 1957. Vol. B70. № 445. Pp. 11–23.
2. Брагинский С.И. О поведении полностью ионизованной плазмы в сильном магнитном поле. // ЖЭТФ. 1957. Т. 33. Вып. 9. С. 645–653.
3. Shearer J.W. Contraction of z-pinches actuated by radiation losses // Phys. Fluids. 1976. Vol. 19. № 9. P. 1426.
4. Вихрев В.В. Сжатие Z-пинча из-за потерь на излучение // Письма в ЖЭТФ. 1978. Т. 27. Вып. 2. С. 104–107.
5. Короп Е.Д., Мейерович Б.Э., Сидельников Ю.В., Сухоруков С.Т. Микропинч в сильноточном диоде. // УФН. 1979. Т. 129. Вып. 1. С. 87–111.
6. Блинников С.И., Имшенник В.С. Динамика радиационного коллапса с учетом обогащения примесью в простой модели плазменного фокуса // Физика плазмы. 1982. Т. 8. № 1. С. 193–205.
7. Вихрев В.В., Иванов В.В., Кошелев К.Н. Формирование и развитие микропинчевой области в вакуумной искре. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. Вып. 6. С. 1211–1219.
8. Lindemuth I.R. Two-dimensional fiber ablation in the solid-deuterium Z-pinch. // Phys. Rev. Lett. 1990. Vol. 65. № 2. Pp. 179–182.
9. Venneri F., Boulais K., Gerdin G. Changes in compression dynamics for seeded plasma focus pinches. // Phys. Fluids. 1990. Vol. 2. № 7. Pp. 1613–1617.
10. Орешкин В.И. О радиационном коллапсе в Z-пинчах // Изв. вузов Физ. 1997. Т. 40. № 12. С. 76–83.
11. Bernal L., Bruzzone H. Radiative collapses in Z-pinches with axial mass losses. // Plasma Phys. and Contr. Fusion. 2002. Vol. 44. № 2. Pp. 223–231.
12. Мейерович Б.Э. На пути к осуществлению электромагнитного коллапса. // УФН. 1986. Т. 149. Вып. 2. С. 221–257.

13. Cohen L., Feldman U., Swartze M., Underwood J.H. Study of the X-ray produced by vacuum spark. // *J. Opt. Soc. America*. 1968. Vol. 58. № 6. Pp. 843–846.
14. Lee T.N., Elton R.C. X-Radiation from optical and inner shell transitions in a highly ionized dense plasma. // *Phys. Rev. A*, 1971. Vol. 3. № 3. Pp. 865–871.
15. Lee T.N. Solar-flare and laboratory plasma phenomena // *Astrophysical Journal*. 1974. Vol. 190. Pp. 467–479.
16. Schwob J.L., Frankel B.S. Evidence for high temperature in minute plasma points from X-ray spectra of Fe XXV and Fe XXVI. // *Phys. Letters*. 1972. Vol. 40A. № 1. Pp. 81–82.
17. Welch T.J., Clothiaux E.J. X-ray structure of a pinched plasma in a vacuum spark // *J. Appl. Phys.* 1974. Vol. 45. № 7. Pp. 3825–3827.
18. Гольц Э.Я., Житник И.А., Кононов Э.Я., Мандельштам С.Л., Сидельников Ю.В. Лабораторное воспроизведение спектра рентгеновской вспышки на Солнце // *Докл. Акад. Наук*. 1975. Т. 200. № 3. С. 560–563.
19. Turechek J.J., Kunze H.J. Time-resolved spectroscopy observation of a high-temperature, high-density plasma in a vacuum spark // *Z. Physik*. 1975. Vol. A273. Pp. 111–121.
20. Morita S., Fujita J. Spatially resolved K_{α} spectra of two-structure plasma in vacuum spark. // *Appl. Phys. Lett.* 1983. Vol. 43. № 5. Pp. 443–445.
21. Веретенников В.А., Грибков В.А., Кононов Э.Я., Семенов О.Г., Сидельников Ю.В. Исследование динамики разряда малоиндуктивной вакуумной искры с помощью лазерной теневой методики // *Физика плазмы*. 1981. Т. 7. Вып. 2. С. 455–463.
22. Веретенников В.А., Полухин С.Н., Семенов О.Г., Сидельников Ю.В. Экспериментальное исследование динамики микропинча вакуумной искры. // *Физика плазмы*, 1981, Т. 7, вып. 6, С. 1199–1207.
23. Семенов О.Г. Исследование структуры разряда и роли ускорительных процессов в плазменном фокусе и микропинче. // *Дисс. ... канд. физ.-мат. наук*. М., 1980. 152 с.
24. Peacock N.I., Speer R.L., Hobby M.G. Spectra of highly ionized neon and argon in plasma focus discharge. // *Journ. Phys. D: Atom. Molec. Phys.* 1969. Vol. 2. Pp. 798–810.
25. Анциферов П.С., Кошелев К.Н., Крауз В.И. и др. Измерение электронной плотности микропинчей плазменного фокуса по диэлектронным сателлитам // *Физика плазмы*. 1990. Т. 16. № 11. С. 1319–1324.
26. Захаров С.М., Иваненков Г.В., Коломенский А.А., Пикуз С.А., Самохин А.И. Исследование плазмы взрывающихся проволочек в диоде сильноточного ускорителя // *Физика плазмы*. 1983. Т. 9. Вып. 3. С. 469–476.
27. Deeney C., Douglas M.R., Spielman R.B. et al. Enhancement of X-ray power from a Z-pinch using nested-wire arrays // *Phys. Rev. Lett.* 1998. V. 81. № 22. P. 4883 – 4886.
28. S.A. Pikuz, T.A. Shelkovenko, D.B. Sinars, P.A. Hammer, S.V. Lebedev, S.N. Bland, Y. Skobelev, J. Abdallah, C.J. Fontes, H.L. Zhang. Spatial temporal and spectral characteristics of an X-pinch. // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2001. Vol. 71. № 6. Pp. 581–594.
29. Krejčí A., Rauš J., Piffil V. et al. Multichannel soft X-ray of hot plasma evolution in nitrogen-puff Z-pinch // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1993. Vol. 21. № 5. Pp. 584–587.
30. Imasaka K., Kawazoe K., Kawauchi K. et al. Reduction of the source size of gas-puff Z-pinch plasmas using an inductive pulsed power system // *Rev. Sci. Instrum.* 2000. Vol. 71. № 12. Pp. 4438–4444.
31. Ivanov V.V., Kalaidzidis Va.L., Zakharov A.I. Formation of point source of soft X-ray radiation (SAR) in channel of Z-pinch in dense gas. // *20-th Conf. Phenom. Ionized Gases, II Ciocco*. 8 – 12 July, 1991. Contrib. Pap. 3. Pisa. 1991. Pp. 759–760.
32. Веретенников В.А., Долгов А.Н., Крохин О.Н., Семенов О.Г. Структура микропинча в сильноточном разряде // *Физика плазмы*. 1985. Т. 11. Вып. 8. С. 1007–1010.
33. Гулин М.А., Долгов А.Н., Николаев О.В., Савёлов А.С. О параметрах излучающей плазмы в микропинчевом разряде // *Физика плазмы*. 1990. Т. 16. Вып. 8. С. 1015–1017.
34. Гулин М.А., Долгов А.Н., Кириченко Н.Н., Ляпидевский В.К., Масленникова Н.В., Савёлов А.С. Измерение электронной температуры плазмы микропинчевого разряда по ослаблению потока рентгеновского излучения в ядерной эмульсии // *ПТЭ*. 1996. № 6. С. 82–86.
35. Долгов А.Н. Скейлинг по току излучательных характеристик микропинчевого разряда // *Физика плазмы*. 2005. Т. 31. № 8. С. 733–741.

36. Захаров С.М., Иваненков Г.В., Коломенский А.А., Пикуз С.А., Самохин А.И. Исследование плазмы взрывающихся провочек нагрузок в диоде сильноточного ускорителя // Физика плазмы. 1987. Т. 13. № 2. С. 206–215.
37. Аверкиев В.В., Долгов А.Н., Ляпидевский В.К., Савёлов А.С., Салахутдинов Г.Х. Многоканальная регистрация динамики рентгеновского излучения микропинчевого разряда // Физика плазмы. 1992. Т. 18. Вып. 6. С. 724–732.
38. Долгов А.Н., Савёлов А.С., Салахутдинов Г.Х. Применение спектрометрического комплекса аппаратуры для рентгеновской диагностики плазмы импульсных установок // Прикладная физика. 2008. №5. С. 35–40.
39. Долгов А.Н., Ляпидевский В.К., Прохорович Д.Е., Савёлов А.С., Салахутдинов Г.Х. Исследование структуры и динамики излучающей плазмы в микропинчевом разряде // Физика плазмы. 2005. Т. 32. №2. С. 192–202.
40. K. Chuangui, M. Favre, E.S. Wyndham, R. Aliaga Rossel, I. Mitchell, L. Soto Observation of plasma dynamics in the vacuum spark // Phys. Plasmas. 1995. Vol. 2. № 10. Pp. 3910–3916.
41. Schulz A., Hebach M., Kunze H.-J., Rosmej F.R., Walden F. Investigations of micropinches with comparison to the predictions of the radiative collapse model // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1994. Vol. 51. Pp. 341–348.
42. Долгов А.Н., Кириченко Н.Н., Ляпидевский В.К., Савёлов А.С., Салахутдинов Г.Х. Наблюдаемый спектр излучения микропинча в диапазоне $1 \text{ кэВ} < h\nu < 300 \text{ кэВ}$ и процессы в его плазме // Физика плазмы. 1993. Т. 19. № 1. С. 97–103.
43. Долгов А.Н., Ляпидевский В.К., Савёлов А.С., Салахутдинов Г.Х. Исследование механизмов генерации рентгеновского излучения в плазме тяжелых элементов зет-пинчевого разряда. // Прикладная физика. 2007. № 1. С. 88–94.
44. Анциферов П.С., Вихрев В.В., Иванов В.В., Кошелев К.Н. Температура плазменных точек в вакуумно-искровых разряда // Физика плазмы. 1990. Т. 16. № 8. С. 1018–1023.
45. Долгов А.Н., Вихрев В.В. Исследование генерации надтепловых электронов в микропинчевом разряде // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 3. С. 290–297.
46. Горбунов А.А., Гулин М.А., Долгов А.Н., Николаев О.В., Савёлов А.С. Прямая регистрация потока надтепловых электронов из плазмы микропинчевого разряда // Письма в ЖЭТФ. 1989. Т. 50. Вып. 7. С. 320–322.
47. Веретенников В.А., Гурей А.Е., Долгов А.Н., Семенов О.Г., Тихомиров А.А. Плазма микропинчевого разряда как источник ионов тяжелых элементов // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. Вып. 22. С. 78–81.
48. Гурей А.Е., Долгов А.Н., Прохорович Д.Е., Савёлов А.С., Тихомиров А.А. Корреляция параметров ионной эмиссии и рентгеновского излучения из плазмы микропинчевого разряда. // Физика плазмы. 2004. Т. 30. № 1. С. 41–46.
49. Долгов А.Н. Результаты регистрации энергетического спектра корпускулярной эмиссии из плазмы микропинчевого разряда // Физика плазмы. 1996. Т. 22. № 7. С. 629–633.
50. Podder N.K., Clothiaux E.J., Oks E. A method for density measurements employing an asymmetry of line shape in dense plasmas and its implementation in a vacuum spark discharge // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2000. Vol. 60. Pp. 441–453.
51. Долгов А.Н., Земченкова Н.В., Прохорович Д.Е. Исследование возможностей управления условиями рождения и транспортировки ионов в разряде сильноточной вакуумной искры // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 6. С. 536–543.
52. Kelly R.L., Palumbo L.J. Atomic and ionic emission lines below 2000 Angstroms. Hydrogen through krypton // Naval Research Laboratory, Washington, D.C. 1973. 992 p.

Статья поступила в редакцию 20 ноября 2015 г.