

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ВУФ-СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРИФЕРИЙНОЙ ПЛАЗМЫ Z-ПИНЧА ИЗ МАЛОПЛОТНОГО ДЕЙТЕРИРОВАННОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

В.В. Александров¹, Е.В. Грабовский¹, А.Н. Грицук¹, С.А. Данько², Е.Д. Казаков², Ю.Г. Калинин², В.Д. Королев², С.Ф. Медовщиков¹, К.Н. Митрофанов¹, Г.М. Олейник¹, В.Г. Пименов³, Г.И. Устроев², А.П. Шевелько⁴

¹ Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Московская обл., Россия

² НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³ Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН, Москва, Россия

⁴ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

В работе представлены результаты измерения электронной температуры периферийной плазмы дейтерированного Z-пинча по спектрам излучения диагностической добавки железа в диапазоне вакуумного ультрафиолета (ВУФ) на установке «Ангара 5-1». Для регистрации спектра использовался спектрометр скользящего падения с вогнутой дифракционной решёткой. Значение электронной температуры определялось по положению максимума распределения спектра (основываясь на методе, описанном в работах [1, 2]) и по максимальной наблюдаемой степени ионизации железа. Полученные в результате измерений значения электронной температуры периферийной плазмы попадают в диапазон 200—400 эВ в зависимости от параметров эксперимента и области измерения.

Ключевые слова: ВУФ-спектроскопия, диагностика плазмы, дейтерированные Z-пинчи, мощный импульсный генератор тока.

VACUUM ULTRA-VIOLET SPECTROSCOPY METHODS USE FOR ELECTRON TEMPERATURE MEASURING IN THE PERIPHERAL PLASMA OF Z-PINCH PRODUCED FROM LOW-DENSITY DEUTERATED POLYETHYLEN

V.V. Aleksandrov¹, E.V. Grabovskij¹, A.N. Gritsuk¹, S.A. Dan'ko², E.D. Kazakov², Yu.G. Kalinin², V.D. Korolev², S.F. Medovschikov¹, K.N. Mitrofanov¹, G.M. Olejnik¹, V.G. Pimenov³, G.I. Ustroeв², A.P. Shevel'ko⁴

¹ State Research Center Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, Moscow Region, Russia

² NRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

³ N. D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry of Russian Academy of Science, Moscow, Russia

⁴ P.N. Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Science, Moscow, Russia

Results of electron temperature measurements in peripheral plasma of deuterated Z-pinch by vacuum ultra-violet (VUV)-spectroscopy methods are presented. Grazing incidence spectrograph with concave grating was used for registering VUV-spectra of iron (Fe) diagnostic admixture. Experiments were carried out at "Angara 5-1" high current generator. The values of electron temperature determined from maximum of spectral distribution in VUV-range (the method was described in articles [1, 2]) and from maximal Fe ionization state were in the range 200—400 eV depending on the-experimental parameters and measurement area.

Key words: VUV spectroscopy, plasma diagnostics, deuterated Z-pinch, high current generator.

При исследовании динамики плазмы дейтерированного Z-пинча с малой (100 мг/см^3) плотностью исходной нагрузки, применяемого в экспериментах по изучению механизмов генерации нейтронов [3—5], необходимо получать информацию не только из областей с самой высокой температурой и плотностью, но и с периферийных участков плазмы [6, 7]. В работах [3, 4] было показано, что при токе 2—2,7 МА параметры плазмы в горячей точке варьируются в зависимости от параметров нагрузки в режиме работы установки в следующих диапазонах: электронная температура 1—2 кэВ, ионная температура 3—13 кэВ, электронная плотность порядка 10^{22} см^{-3} . В то же время большое значение для изучения динамики таких Z-пинчей имеет исследование параметров плазмы, находящейся не только на оси нагрузки, но и на её периферии [6, 7].

Целью данной работы является исследование плазмы в окрестностях горячей точки малоплотного дейтерированного Z-пинча, сформированного при имплозии нагрузок специальной формы на мощном генераторе высоковольтных импульсов тока «Ангара 5-1» (ток до 3,5 МА, время нарастания 120 нс) с использованием методов спектроскопии в области ВУФ-излучения [1].

Для усиления эффекта фокусировки энергии центральная часть нагрузок (перетяжка) была выполнена из микропористого дейтерированного полиэтилена плотностью 100 мг/см^3 и диаметром $1\text{—}1,3 \text{ мм}$. В вещество перетяжки вносилась диагностическая добавка более тяжёлого элемента (железа) в количестве $5\text{—}7\%$ по массе [8]. Перетяжка либо располагалась между двумя агар-агаровыми столбиками (рис. 1, *а*), либо устанавливалась в зазор между медными цилиндрическими электродами (рис. 1, *б*).

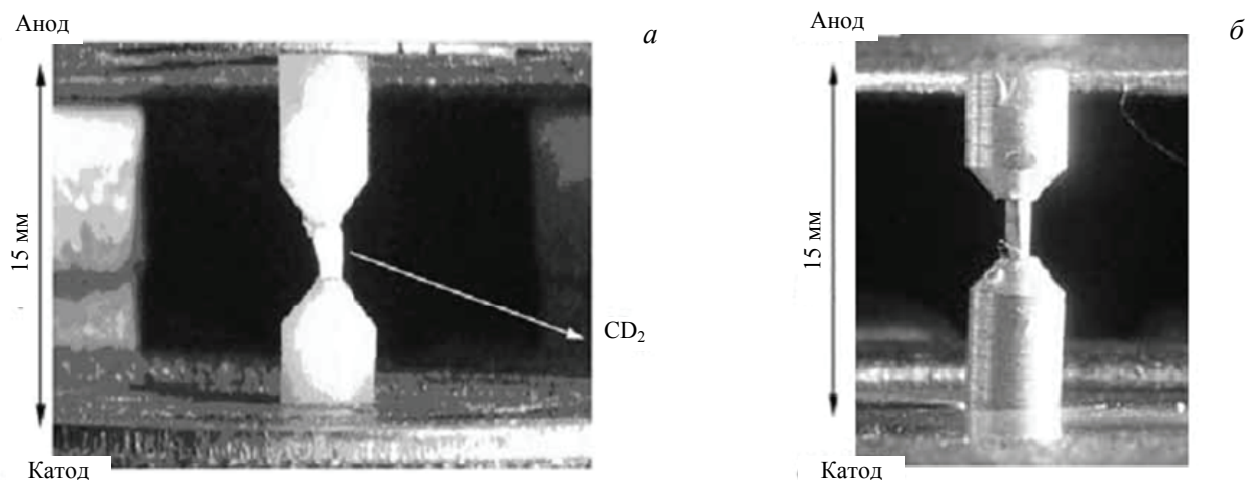
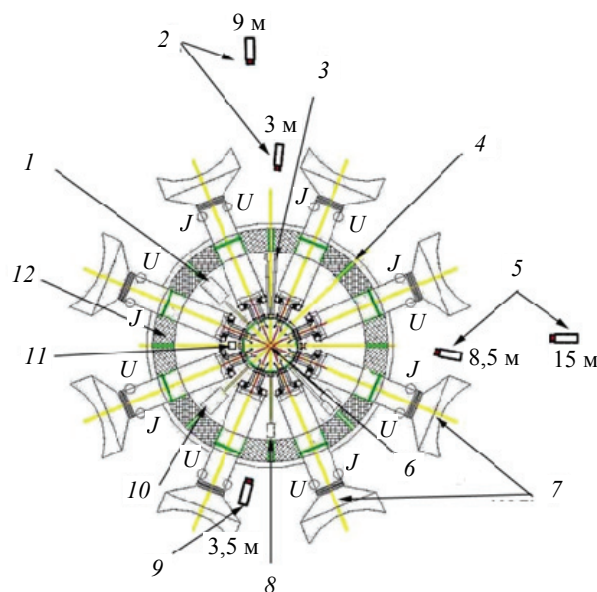


Рис. 1. Внешний вид нагрузок: *а* — перетяжка установлена между агар-агаровыми столбиками; *б* — узел с медными коническими электродами

Расстояние между электродами Z-пинчевого разряда составляло 15 мм . Пространственно-временные характеристики плазмы измерялись с помощью диагностического комплекса установки «Ангара-5-1» (рис. 2). Информация о временной эволюции плазмы пинча осуществлялась с помощью двух оптических щелевых развёрток вдоль оси пинча и по его радиусу с временным разрешением $0,3 \text{ нс}$. Фотографирование изображений пинча в мягком рентгеновском диапазоне спектра было выполнено с помощью рентгеновского ЭОП на основе микроканальной пластины, обеспечивающего получение трёх кадров в один момент времени с экспозицией 2 нс в диапазоне энергии фотонов $E > 20, 120 \text{ и } 600 \text{ эВ}$.

Рис. 2. Расположение методик диагностического комплекса установки «Ангара-5-1»: 1 — спектрограф скользящего падения, $\Delta\lambda = 10\text{—}400 \text{ \AA}$; 2 — сцинтилляционные детекторы, установленные вдоль оси пинча над анодом; 3 — набор рентгеновских вакуумных фотоэмиссионных детекторов (с энергией отсечки 100 эВ , $E > 170$ и 750 эВ); 4 — вывод излучения на оптические щелевые развёртки, ориентированные вдоль оси нагрузки и перпендикулярно к ней; 5 — сцинтилляционный детектор, установленный по нормали к оси пинча; 6 — нагрузка; 7 — модули установки «Ангара-5-1»; 8 — трёхкадровый рентгеновский ЭОП (спектральный диапазон $E > 20, 120, 600 \text{ эВ}$); 9 — сцинтилляционный детектор, установленный вдоль оси пинча под катодом; 10 — трёхкадровая рентгеновская камера-обскура (спектральный диапазон $E > 20, 120, 600 \text{ эВ}$); 11 — активационный детектор; 12 — бетонная защита; *J* — датчик производной тока; *U* — датчик напряжения



Структура плазмы определялась с помощью интегрального по времени фотографирования с помощью камеры-обскуры с тремя отверстиями. Одно из этих отверстий было открыто, на двух других устанавливались алюминиевый и лавсановый фильтры толщиной 3 и 2 мкм соответственно.

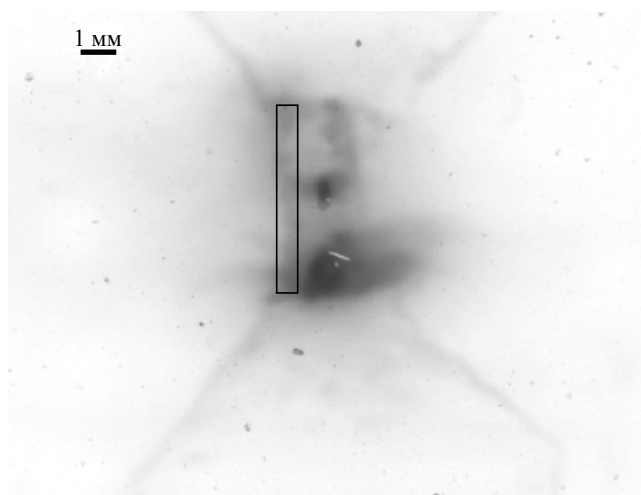


Рис. 3. Изображение нагрузки за лавсановым фильтром (в излучении >120 эВ) в выстреле № 5097, полученное с помощью камеры-обскуры: прямоугольник — область плазмы, из которой регистрируется спектр



Рис. 4. Схема регистрации ВУФ-спектра

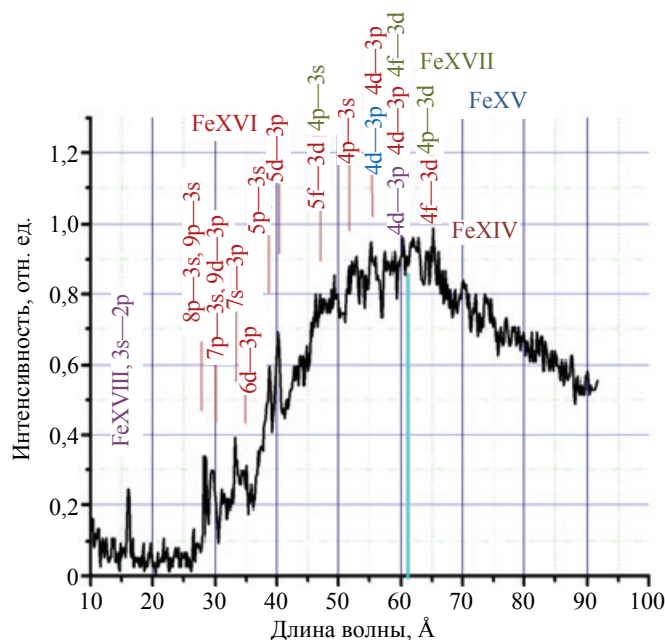


Рис. 5. Спектр ионов Fe в окрестностях горячей точки, полученный в эксперименте № 5103

ионов железа FeXV—FeXVIII в рамках корональной модели составила величину $T_e \sim 270$ эВ [10]. Полученный разброс соответствует погрешности использованного метода и согласуется с предварительными оценками, полученными в процессе эксперимента [11].

Электронная температура в окрестностях горячей точки (рис. 3) определялась из спектров ВУФ-излучения, полученных с помощью спектрографа скользящего падения с использованием внеоруландовской схемы [1, 2]. Особенностью данной схемы является то, что детектор излучения (в данном случае фотоплёнка) пересекает круг Роуланда, что позволяет значительно расширить диапазон регистрации, сохранив при этом компактность прибора. Расширение регистрируемого диапазона происходит за счёт значительного сокращения спектрального разрешения, которое, однако, в данном случае не играет особой роли.

Схема спектрографа с внеоруландовской схемой для регистрации спектров ВУФ-излучения представлена на рис. 4. Спектрограф состоял из металлического корпуса, в котором установлены входная щель, дифракционная решётка скользящего падения (радиус $R = 1$ м, угол скольжения 4° , 600 штр./мм, покрытие W/Re), и кассеты для фотоплёнки. Для ограничения угловой апертуры использовалась дополнительная диафрагма, устанавливаемая между входной щелью и дифракционной решёткой. Разрешение спектрографа на центральной длине волны $\lambda/\delta\lambda \sim 100$, пространственное разрешение по объекту составляет 250 мкм.

Оценка электронной температуры по спектрам многозарядных ионов Fe в диапазоне длин волн 20—800 Å производилась по методике, описанной в работе [1] и апробированной в лаборатории Сандия на генераторе Z-Machine. Суть методики заключается в сравнении полученных в наших экспериментах спектров (рис. 5) со спектрами наносекундной лазерной плазмы с хорошо известной температурой [9]. Предварительная оценка параметров плазмы в рассматриваемой области показала, что её сравнение с наносекундной лазерной плазмой, описываемой корональной моделью, является вполне корректным. Использование метода определения температуры по максимуму спектрального распределения [1, 2] даёт значение электронной температуры $T_e = 300$ эВ. Оценка электронной температуры по наличию в плазме

В то же время при более подробном рассмотрении область спектра вблизи нулевого порядка в областях, наиболее близких к горячей точке, можно наблюдать ионы железа с очень высокой степенью ионизации FeXXII—FeXXIII (рис. 6).

Исследование зависимости электронной температуры от расстояния до оси нагрузки (в диапазоне 0,5—1,5 мм) по положению максимума спектрального распределения показало, что температура меняется в диапазоне 200—400 эВ (рис. 7). Верхняя граница, вероятно, является оценкой снизу для наиболее горячих областей и требует проверки методами рентгеновской спектроскопии в более подходящем интервале энергий квантов для измерения электронной температуры порядка 1 кэВ. Стоит ещё раз подчеркнуть, что в данной работе рассматривалась область в окрестностях горячей точки — в самой горячей точке электронная температура может быть значительно выше [3, 4].

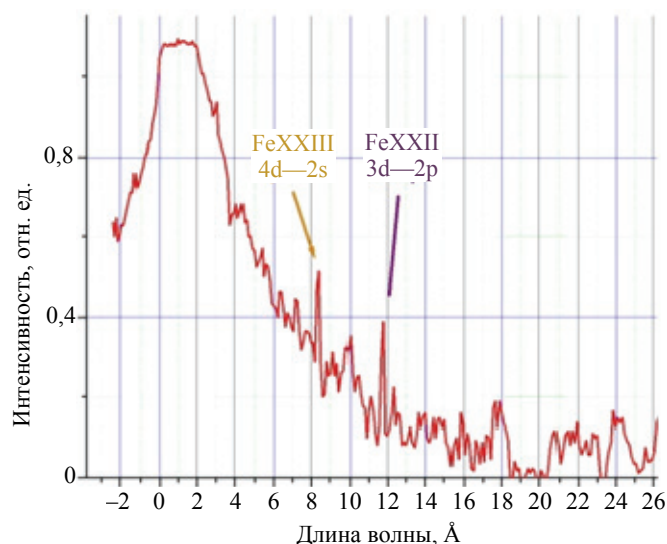


Рис. 6. Детальное рассмотрение области спектра вблизи нулевого порядка

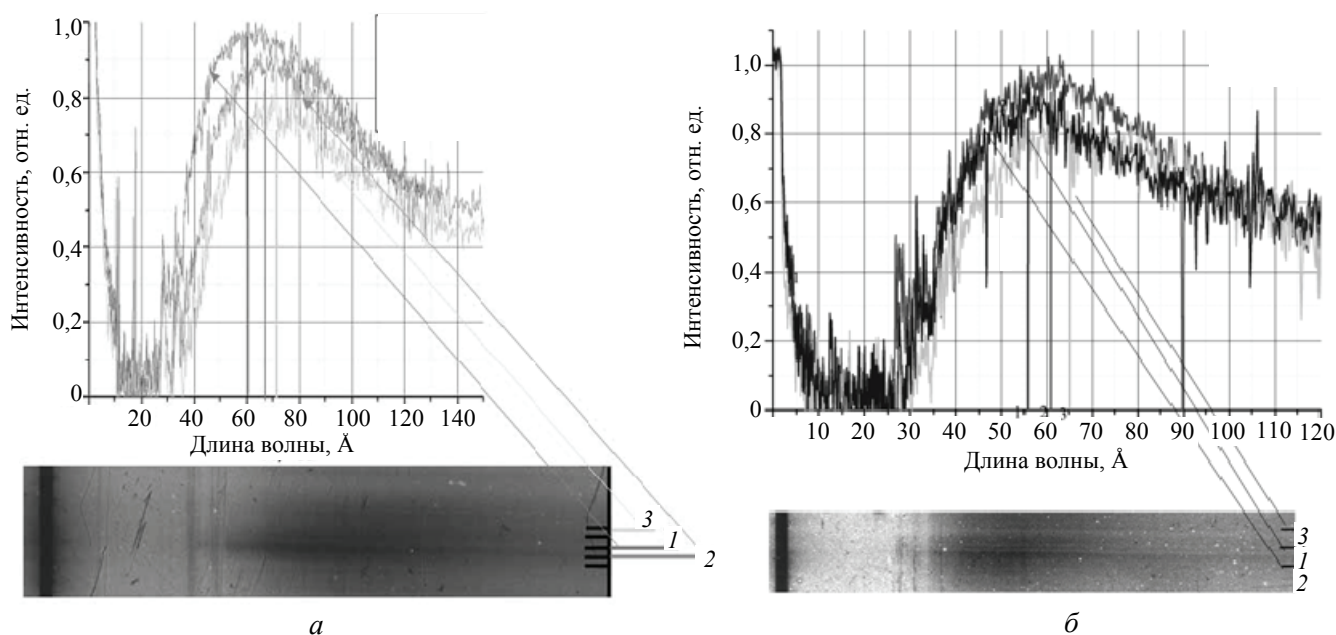


Рис. 7. Характерные спектры на различном удалении от оси нагрузки с отмеченными значениями максимального значения длин волн и соответствующими им значениями температур: № 5166 — 300 (1), 220 (2), 190 эВ (3) (а); № 5103 — 400 (1), 300 (2), 235 эВ (3) (б)

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 12-02-00522-а, № 12-02-31321-мол_а, № 13-02-00013, № 13-02-00482, № 11-02-00492-а и № 12-02-00369-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевелько А.П., Блисс Д.Е., Казаков Е.Д. и др. ВУФ-спектроскопия плазмы, создаваемой в конечном анод-катодном промежутке сильнотоочного импульсного генератора «Z-Machine» (SNL). — Физика плазмы, 2008, т. 34, № 11, с. 1021—1032.
2. Митрофанов К.Н., Грабовский Е.В., Грицук А.Н. и др. Особенности структуры излучающей области при токовом сжатии пенопроволочныхборок на установке Ангара-5-1. — Физика плазмы, 2013, т. 39, № 1, с. 71—96.
3. Bakshaev Yu.L., Blinov P.I., Chernenko A.S. et al. — Czechoslovak J. of Physics, 2000, vol. 50, Suppl. S3, p. 121—126.

4. Бакшаев Ю.Л., Блинов П.И., Вихрев В.В. и др. — Физика плазмы, 2006, т. 32, № 7, с. 579—587.
5. Akunets A.A., Anan'ev S.S., Bakshaev Yu.L. et al. — Eur. Phys. J., 2009, D 54, p. 499—502.
6. Ананьев С.С., Бакшаев Ю.Л., Бартов А.В. и др. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 4, с. 3—24.
7. Ананьев С.С., Бакшаев Ю.Л., Блинов П.И. и др. — Письма в ЖЭТФ, 2008, т. 87, № 7—8, с. 426—432.
8. Борисенко Н.Г., Акимова И.В., Громов А.И. и др. Поглощение интенсивного лазерного излучения (до 10^{15} Вт/см²) и перенос энергии в подкритических средах, в т.ч. содержащих добавки тяжелых элементов: Препринт ФИАН 26, 2005.
9. Ананьин О.Б., Афанасьев Ю.В., Быковский Ю.А., Крохин О.Н. — В кн.: Лазерная плазма. — М., МИФИ, 2003.
10. Post D.E., Jensen R.V., Tarter C.B. et al. Steady-state radiative cooling rates for low-density, high-temperature plasmas. — Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1977, vol. 20, p. 367—436, doi: 10.1016/0062-640X(77)60026-2.
11. Александров В.В., Грабовский Е.В., Грицук А.Н. и др. Измерение электронной температуры плазмы в окрестности горячей точки дейтерированного Z-пинча методами ВУФ-спектроскопии. — В сб.: Тезисы XL Межд. (Звенигородской) конф. по физике плазмы и УТС, 2013, с. 96.



Владимир Васильевич Александров, к.ф.-м.н., заместитель директора отделения; ГНЦ ТРИНИТИ, 142190, МО, Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12, Россия
alexvv@triniti.ru



Евгений Валентинович Грабовский, к. техн. н., лауреат Государственной премии Российской Федерации, директор отделения; ГНЦ ТРИНИТИ, 142190, МО, Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12, Россия
angara@triniti.ru



Аркадий Николаевич Грицук, н.с.; ГНЦ ТРИНИТИ, 142190, МО, Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12, Россия,
Griar@triniti.ru



Сергей Александрович Данько, д.ф.-м.н., начальник лаборатории; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия
danko@dap.kiae.ru



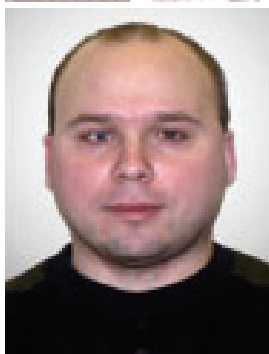
Евгений Давидович Казаков, к.ф.-м.н., начальник лаборатории; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия
kazakoved82@gmail.com



Юрий Григорьевич Калинин, д.ф.-м.н., начальник отдела; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия
kalinin@dap.kiae.ru



Валерий Дмитриевич
Королев, д.ф.-м.н., в.н.с.,
ветеран атомной
энергетики и промышлен-
ности; НИЦ «Курча-
товский институт»,
123182, Москва, пл.
Академика Курчатова,
д. 1, Россия
korolev@dap.kiae.ru



Константин Николаевич
Митрофанов, к.ф.-м.н.,
с.н.с.; ГНЦ ТРИНИТИ,
142190, МО, Троицк, ул.
Пушковых, вл. 12, Россия
mitrkn@inbox.ru



Владимир Григорьевич
Пименов, к. хим. н.,
с.н.с.; Институт орга-
нической химии им. Д.Н.
Зеленского, 119991,
Москва, Ленинский
проспект, д. 47, Россия
pimenovv@mail.ioc.ac.ru



Александр Петрович
Шевелько, ведущий
научный сотрудник,
д.ф.-м.н.; Физический
институт им. П.Н. Лебе-
дева РАН, 119991,
Москва, Ленинский
проспект, д. 53, Россия
apshev51@gmail.com



Станислав Феокистович
Медовщиков, к. техн. н.,
руководитель группы; ГНЦ
ТРИНИТИ, 142190, МО,
Троицк, ул. Пушковых, вл.
12, Россия
angara@triniti.ru



Георгий Михайлович
Олейник, к. техн. н., лауреат
Государственной премии
Российской Федерации,
начальник лаборатории;
ГНЦ ТРИНИТИ, 142190,
МО, Троицк, ул. Пушковых,
вл. 12, Россия
oleinik@triniti.ru



Геннадий Иванович
Устров, с.н.с.; НИЦ
«Курчатовский институт»,
123182, Москва, пл.
Академика Курчатова, д. 1,
Россия
korolev@dap.kiae.ru

Статья поступила в редакцию 11 июня 2013 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2013, т. 36, вып. 3, с. 68—73.