

К 60-ЛЕТИЮ ОГРЫ

В.В. Арсенин, В.А. Жильцов, В.М. Кулыгин, О.И. Обрезков, А.В. Переславцев, А.В. Спицын

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Дан краткий обзор результатов экспериментальных и теоретических исследований, выполненных в созданном по инициативе И.В. Курчатова в Институте атомной энергии отделе Огра. Они относятся к открытым магнитным ловушкам, токамакам, инжекторам, элементарным процессам, физике и технике высокого вакуума, ряду технологических применений плазмы.

Ключевые слова: Огра, открытая ловушка, токамак, инжектор, элементарные процессы, вакуум, плазменные технологии.

TO THE 60th ANNIVERSARY OF THE OGRA

V.V. Arsenin, V.A. Zhiltsov, V.M. Kulygin, O.I. Obrezkov, A.V. Pereslvtsev, A.V. Spitsyn

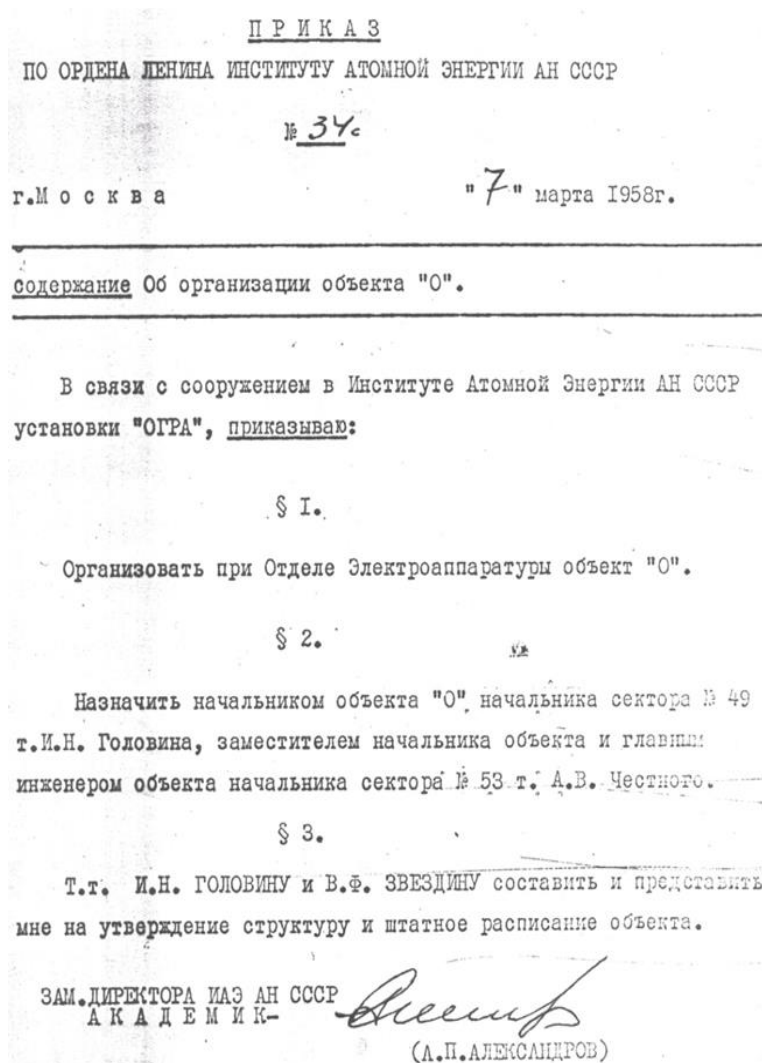
NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

A brief review of experimental and theoretical results achieved in Ogra Department of Kurchatov Institute is presented. The results are related to open-ended magnetic traps, tokamaks, injectors, unit processes, vacuum technique, some plasma technologies.

Key words: Ogra, mirror machine, tokamak, injector, unit processes, vacuum technique, plasma technologies.

DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-2-13-22

7 марта 1958 г. в Институте атомной энергии АН СССР было образовано новое подразделение Объект «О», вскоре, в 1959 г., получившее название Отдел Огра:



Ставилась задача изучить возможность осуществить термоядерную реакцию в плазме, удерживаемой в предложенной Г.И. Будкером и Р. Постом ловушке с магнитными пробками.

Начальником подразделения был назначен И.Н. Головин. В течение года собран-



Игорь Николаевич Головин

ный Игорем Николаевичем коллектив, первыми сотрудниками которого стали Д.А. Панов, Н.Н. Семашко, Г.Ф. Богданов, Л.И. Артеменков, В.И. Пистунович, создал крупнейшую на то время плазменную установку Огра. Основные сведения о конструкции Огры опубликовал И.В. Курчатov [1] в 1958 г. Первое сообщение об опытах на ней сделано на конференции Общества инженеров-электриков в Лондоне в 1959 г. [2].

Магнитное поле между пробками ловушки, длина которой составляла 12 м, могло достигать 5 кЭ, в пробках 8 кЭ. Накопление плазмы объёмом 8 м³ в Огре происходило в результате диссоциации молекулярных ионов водорода энергией 100—200 кэВ. Для получения пучка использовался дуговой источник, разработанный Н.Н. Семашко на основе конструкции П.М. Морозова, который предназначался для электромагнитного разделения изотопов. Он позволял получать пучки молекулярных ионов энергией до 200 кэВ и током 300—400 мА, из которых 150—200 мА вводилось в ловушку. Согласно измерениям [3] концентрация энергичных протонов ограничивалась на уровне $\sim 10^7$ см⁻³. Осознавалось, что ограничение может быть связано с неустойчивостями, в частности, магнитогидродинамической желобковой, причём обсуждался способ борьбы с ней созданием магнитной ямы путём добавления поля от обмотки стеллараторного типа [3]. Неустойчивости действительно выявились: желобковая и кинетическая циклотронная, порождаемая анизотропией ионного распределения. В опытах на Огре впервые в мире был обнаружен стабилизирующий эффект, оказываемый на желобковые колебания дифференциальным вращением плазмы в радиальном электрическом поле [4]. Роль вращения в устойчивости и переносе плазмы, в том числе в токамаках, изучается во всём мире теоретически и экспериментально по сей день.



Вид установки Огра

ОТКРЫТЫЕ ЛОВУШКИ

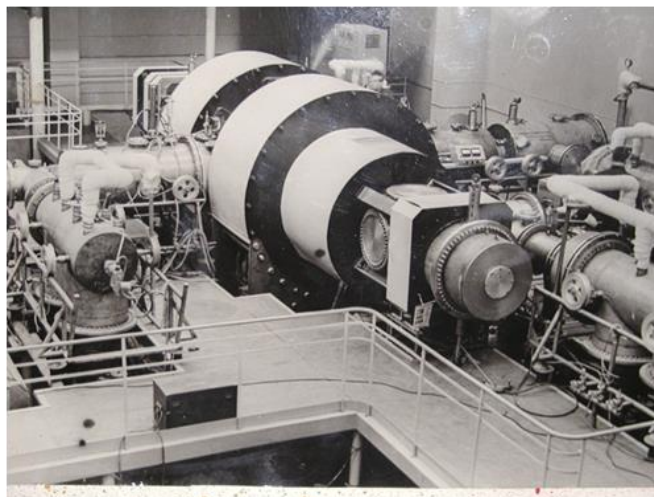
Поведение плазмы в открытых ловушках было предметом исследований в отделе (его название в дальнейшем менялось, но у научной общественности с коллективом ассоциируется наименование Огра) в течение многих лет. В 1964 г. запустили новую осесимметричную ловушку Огра-2. В ней плазма создавалась ионизацией пучка быстрых атомов сильным магнитным полем. На этой установке в 1967 г. было впервые в мире осуществлено подавление желобковой неустойчивости разработанным в отделе методом обратных связей (автоматического регулирования) [5]. Воздействие на крупномасштабные мо-

ды колебаний/неустойчивостей плазмы обратными связями вошло после этого в практику многих лабораторий [6, 7]. В экспериментах на Огре, проведённых в последующие несколько лет, было продемонстрировано [8] подавление с помощью обратных связей (или, по желанию, возбуждение) всех имеющихся при данных параметрах ветвей желобковых колебаний, причём как с положительной, так и с отрицательной энергией. При включённой стабилизации плотность плазмы поднялась по сравнению с той, что получалась без стабилизации, в 50 раз. Была подавлена также циклотронная неустойчивость [9, 10].

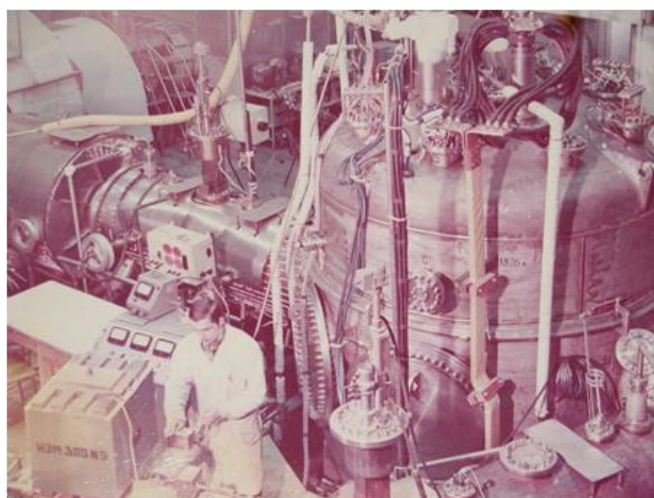
Следующая осесимметричная ловушка Огра-3 (другое название ЛИН-5, 1971 г.) стала первой в мире термоядерной установкой со сверхпроводящими магнитными катушками. Именно на ней, пользуясь постоянством поля сверхпроводящего магнита во времени, были проделаны упомянутые тонкие эксперименты со спектрами колебаний.

Огра-4 (или ЛИН-5Б, 1975 г.) также имела сверхпроводящую обмотку, но не осесимметричную, а «бейсбольную», создающую конфигурацию с $\min B$. В экспериментах оказалось, что, хотя в случае магнитной ямы МГД-неустойчивости нет, удержание на периферии ловушки плохое. Д.А. Панов связал это с расщеплением дрейфовых поверхностей и появлением из-за него в плазме неконтролируемых электрических полей и сформулировал условие отсутствия расщепления — так называемую ортогонализированность магнитного поля [11]. Такой подход к улучшению ловушек с оптимизацией геометрии поля получил развитие не только применительно к открытым системам, но и в современной теории стеллараторов.

В опытах на сверхпроводящем антипробкотроне Огра-4К (вступил в строй в 1986 г.) изучалось поведение плазмы с горячими электронами ($T_e \gg T_i$), получаемой ЭЦР-нагревом, в сильно неоднородном касповом магнитном поле [12]. Компактный касп с электронно-горячей плазмой с небольшим $\beta = 8\pi r/B^2$ рассматривается в качестве МГД-якоря для плазмы высокого давления в длинной ловушке.



Установка Огра-2



Установка Огра-4

ОГРИНСКИЕ ТОКАМАКИ

Огра внесла вклад в прогресс токамаков. В 1971 г. на токамаке ТО-1 совместно с сотрудниками Института кибернетики АН УССР было впервые в мире осуществлено равновесие по большому радиусу без использования кожуха, с помощью обратных связей [13]. С этого времени равновесием в токамаках управляют именно так, нужда в толстом кожухе отпала. На той же установке в 1977 г. удалось подавить с помощью обратных связей, тоже впервые, тиринг-моду неустойчивости, приводящую к малому срыву [14]. В токамаке ТО-2 реализован (1981 г.) тороидальный дивертор [15].

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ

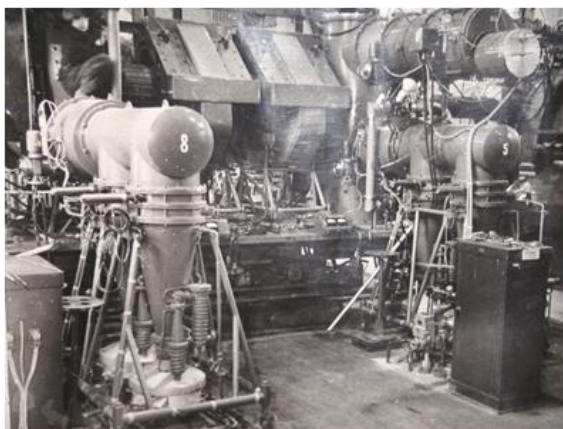
Наряду с экспериментами по магнитному удержанию плазмы проводились (и продолжают) исследования элементарных процессов. Разработан метод расщеплённого пучка, позволивший производить измерения взаимодействия ионов при сверхмалых энергиях [16]. При изучении столкновений ионов D с относительной энергией от 2,5 до 9,2 эВ впервые зарегистрирован образующийся молекулярный ион, определена нижняя граница величины сечения его образования, равная $1,5 \cdot 10^{-14}$ см². Отметим недавнее

достижение группы В.А. Беляева в фундаментальной физике — открытие долгоживущих (время распада — несколько микросекунд) ионов D_2^- , HD^- [17].

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

Область применимости результатов ряда теоретических работ, выполненных на Огре, не ограничивается физикой открытых ловушек. Проблема стабилизации вращением стимулировала анализ колебаний в плазме и в других средах с неоднородным течением. Установлена важность резонансного взаимодействия при совпадении фазовой скорости волны с локальной скоростью направленного движения среды (гидродинамические резонансы) [18, 19]. С влиянием вращения на колебания связывают возникновение транспортных барьеров и переход в Н-режим в токамаках. Значительны достижения сотрудников отдела в теории распространения электромагнитных волн в неоднородной замагниченной плазме, на её базе разработан численный код OGREY, используемый, в частности, в расчётах ЭЦР-нагрева в токамаках. Стабилизирующий эффект ячеек с сильно неоднородным магнитным полем, включение которых в осесимметричные открытые системы без магнитной ямы позволяет придавать им МГД-устойчивость [20], эксплуатируется и в концепции устойчивой замкнутой бестоковой системы EPSILON [21]. В ней заложены важные с реакторной точки зрения возможности: большое β , удержание «токамачного» уровня, стационарность, хорошая технологичность.

ИСТОЧНИКИ ИОННЫХ ПУЧКОВ И ИНЖЕКТОРЫ БЫСТРЫХ АТОМОВ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК



Инжектор Огры-1



Инжекторный стенд ИРЕК для отработки ионных источников для инжекторов Т-15

Существенную часть программы Огры составляла разработка инжекторов для открытых ловушек и токамаков [22—29].

Уже эксперименты на Огре-1 проводились с использованием инъекции пучков быстрых молекулярных ионов водорода через так называемый магнитный канал — систему, организующую локальную «дыру» в поле ловушки, с последующей их диссоциацией и захватом образовавшихся протонов. Для этого были разработаны специальные инжекторы с модернизированными щелевыми источниками П.М. Морозова. Фокусировка пучка молекулярных ионов на вход магнитного канала производилась системой из двух квадрупольных магнитных линз.

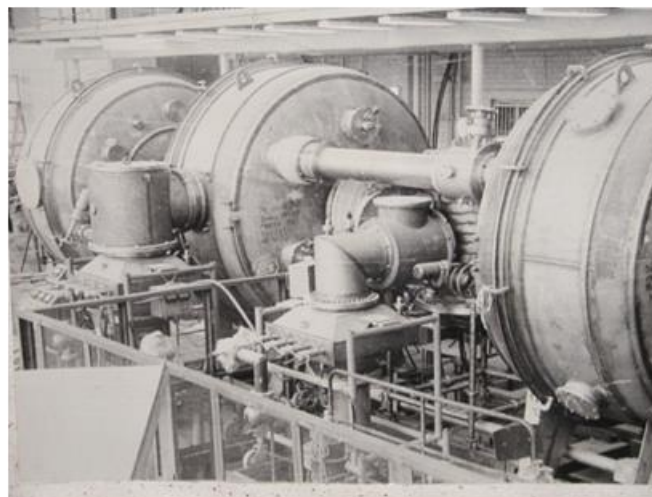
Все последующие инжекторы использовали пучки быстрых атомов, получаемые нейтрализацией ускоренных протонов. Для систем нейтральной инъекции с энергией атомов десятки кэВ, употреблявшихся в большинстве экспериментов на токамаках, разрабатывались источники положительных ионов. В отделе была разработана серия таких источников — для инжекторов токамаков от Т-11 до Т-15.

В системах с пучками атомов высоких энергий нужно получать и ускорять пучки отрицательных ионов с их последующей нейтрализацией — «обдиркой» на газовой мишени. Наряду с источниками отрицательных ионов водорода разрабатывался метод двойной перезарядки: мощный пучок протонов пропусклся

сквозь натриевую мишень, превращаясь в пучок отрицательных ионов, ускоряемых затем электрическим полем.

УЧАСТИЕ В ПРОЕКТЕ ИТЭР

Сотрудники отдела составляли российскую домашнюю команду по разработке инжекционной системы Международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР, участвуя в проекте от стадии разработки концепции до стадии инженерного проектирования. Были проведены расчётные, конструкторские и экспериментальные проработки различных элементов пучкового тракта от ионно-оптической системы источника отрицательных ионов водорода до приёмника нейтрального пучка на выходе инжектора.



Установка МИН для исследования метода двойной перезарядки

ПЛАЗМЕННЫЙ НЕЙТРАЛИЗАТОР

Применение плазменного нейтрализатора отрицательных ионов водорода в системе нейтральной инжекции токамака-реактора обеспечивает увеличение эффективности обдирки до 86% по сравнению с 60% при стандартной газовой нейтрализации. Энергетическая эффективность системы инжекции повышается при этом в 1,4 раза, что весьма существенно для промышленного реактора. В работах, выполненных на Огре, показано, что плазменный нейтрализатор с нужными параметрами может быть построен на основе мультикасповой магнитной ловушки с периферийным ЭЦР-разрядом [30—35].



Магнитная система плазменного нейтрализатора пучка отрицательных ионов

ФИЗИКА И ТЕХНИКА ВЫСОКОГО ВАКУУМА

При создании Огры-1 и других крупных физических установок остро встал вопрос получения сверхвысокого вакуума, что невозможно без научного подхода к проблеме. Поэтому в составе Огры была образована лаборатория вакуумной и криогенной техники (ЛВКТ), которой долгие годы руководил Ю.М. Пустовойт. Лаборатория успешно решала поставленные задачи в области получения вакуума и измерения сверхнизких давлений. Уже в установке Огра-1 было получено уникально низкое для тех лет остаточное давление $2 \cdot 10^{-10}$ торр в объёме почти 30 м^3 . Это было бы невозможно без постоянного соблюдения вакуумной культуры. Начиная с 1980-х годов в ЛВКТ проводились работы по созданию новых типов нераспыляемых геттеров (НГ) для обеспечения необслуживаемой откачки вакуумных камер, электровакuumных приборов, теплоизолированных



Образцы насосов на основе нераспыляемых геттеров

труб. Исследование перспективных материалов для НГ велось, в частности, совместно с итальянской фирмой SAES GETTERS.

Показана перспективность использования НГ в новом типе лифтовых труб, используемых газовой промышленностью в условиях вечной мерзлоты.

Изготовлены образцы насосов на основе НГ для их применения в различных устройствах, для работы которых необходимо поддержание вакуума в условиях отрыва от стационарных средств откачки.

ПРОНИКНОВЕНИЕ ВОДОРОДА В МАТЕРИАЛЫ

В 1990-х годах начались исследования в области взаимодействия изотопов водорода с материалами — проникновения через конструкционные материалы термоядерных реакторов и накопления водорода в них. В последние годы изучены такие материалы, как ферритно-мартенситные стали со сниженным уровнем наведённой активности под действием нейтронного облучения, аустенитные реакторные стали, сплавы ванадия, углеродные материалы и вольфрам [36, 37]. Проводятся исследования влияния дефектов и повреждений на свойства материалов термоядерных установок.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

На Огре велись и ведутся разнообразные исследования прикладной направленности.

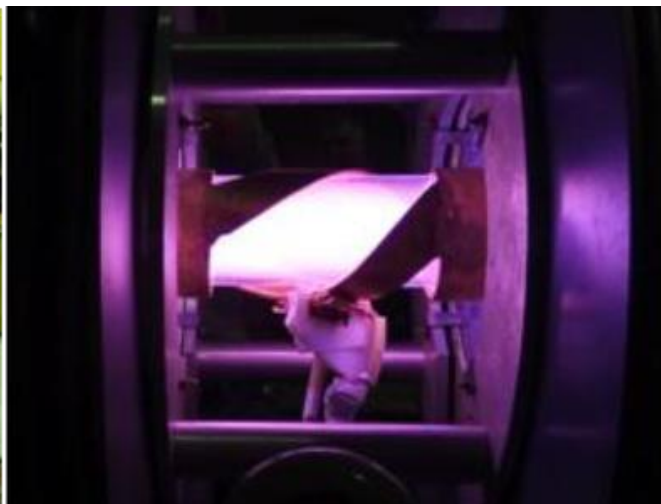
Эксперименты с разрядом в воде, в котором рождаются наночастицы вещества электродов (или вещества специально добавляемого порошка) [38], показали, что в результате внедрения таких частиц в нетканый материал, обрабатываемый разрядом, есть возможность придавать этому материалу некоторые заданные свойства (негорючесть, асептичность и т.п.). Была изготовлена и сертифицирована промышленная партия продукта пониженной горючести.

Предложен способ плазменной сепарации компонентов отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) [39, 40]. Он предполагает преобразование ОЯТ в поток холодной плазмы, селективный нагрев групп ионов в заданных диапазонах масс и последующее пространственное выделение этих групп (сепарацию) из потока при движении в неоднородном магнитном поле. Такими группами могут быть топливо, продукты деления, ценные материалы. В плазме нет ограничений потоков по объёмному заряду, что позволяет получить высокую производительность переработки.

Нынешняя тематика включает исследование возможности создания мощного плазменного ракетного двигателя [41], начаты эксперименты на установке ПС-1 с геликонным источником плазмы и ускорением ионов в постоянном неоднородном магнитном поле в результате взаимодействия с переменным электромагнитным полем ионной циклотронной частоты.



Установка ПС-1



Геликонный разряд

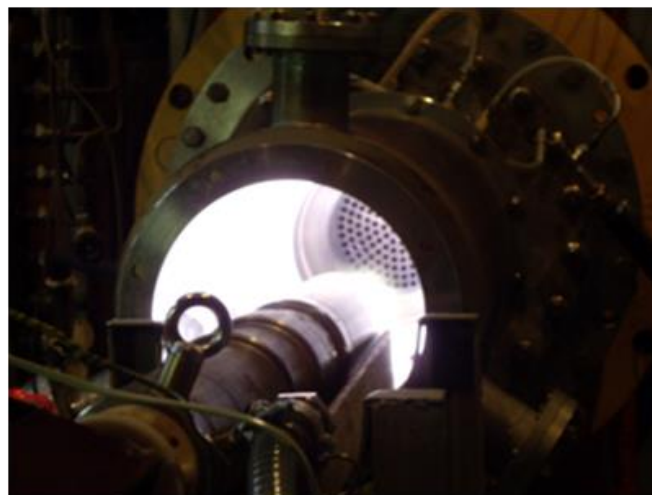
Остановимся подробнее на двух направлениях, работы по которым проводятся продолжительное время.

Высокотемпературная переработка производственных и бытовых отходов плазмотронами. В лаборатории низкотемпературной плазмы разработаны плазмотрон ЭДП-200, источники питания на основе транзисторов IGBT, системы управления с автоматизированным пуском и остановом плазмотрона [42, 43]. Проводятся исследования в области физико-химических процессов в плазменных печах [44, 45], в том числе при переработке радиоактивных отходов [46, 47].

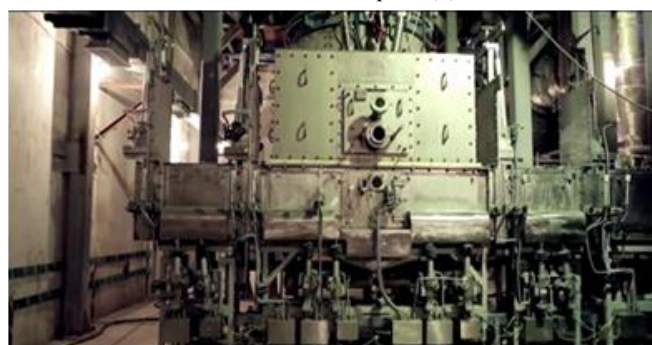
НИЦ «Курчатовский институт» принимал участие в проектировании и сооружении комплекса плазменной переработки радиоактивных отходов Нововоронежской АЭС. Монтажные и пусконаладочные работы были завершены в первом квартале 2015 г., и комплекс передан в опытно-промышленную эксплуатацию. Производительность комплекса 250 кг/ч, или 1800 тонн отходов в год.

Под научным руководством НИЦ «Курчатовский институт» выполнено проектирование завода плазменной переработки отходов производительностью 250 000 тонн отходов в год. Работа не завершена из-за недостатка финансирования.

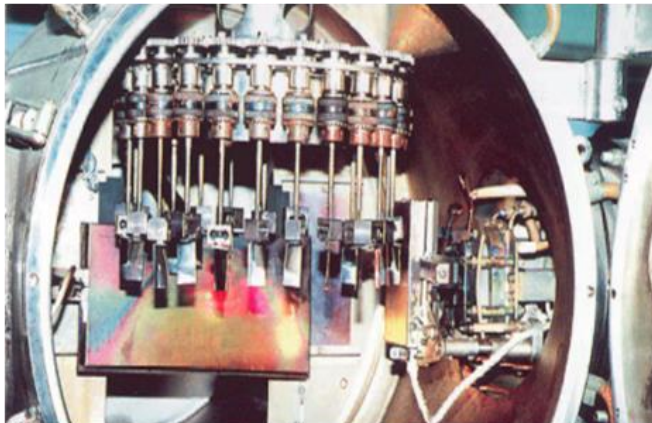
Применение плазменных технологий для обработки поверхностей деталей. В 1990-х годах в Курчатовском институте разрабатывались установки серии ВИТА для ионно-лучевой обработки лопаток авиационных газотурбинных двигателей с целью повышения эксплуатационных показателей по усталостной вибропрочности. Облучение поверхности лопатки создаёт вблизи поверхности кристаллическую наноструктуру и снижает скорость образования зарождающихся микротрещин. Технология внедрена в Уфимском моторостроительном объединении, и в настоящее время там работает специальный производственный участок с четырьмя установками упомянутой серии. Дальнейшее развитие этих технологий проводилось совместно с ПАО НПО «Сатурн» (г. Рыбинск) и ПАО УМПО (г. Уфа). Создано оборудование для защиты лопаток паровых турбин больших энергетических установок от водно-капельной эрозии и коррозии — установка «Виктория-2», на которой можно обрабатывать лопатки паровых турбин длиной до 1 м.



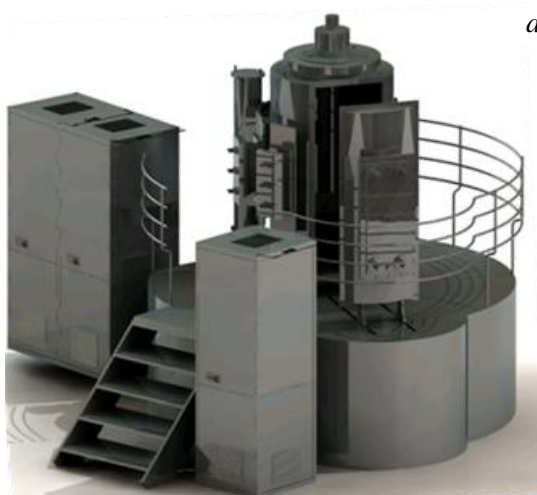
Работающий плазмотрон ЭДП-200



Плазменная печь (вид со стороны плавильной камеры) комплекса плазменной переработки радиоактивных отходов НВАЭС



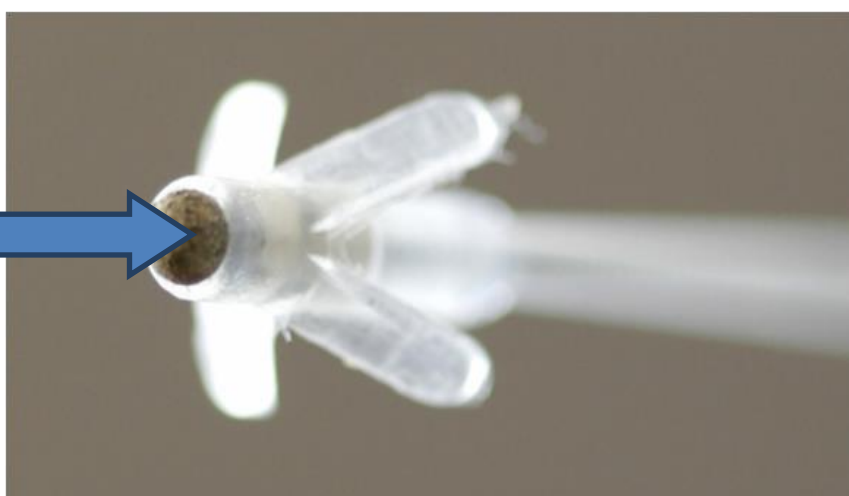
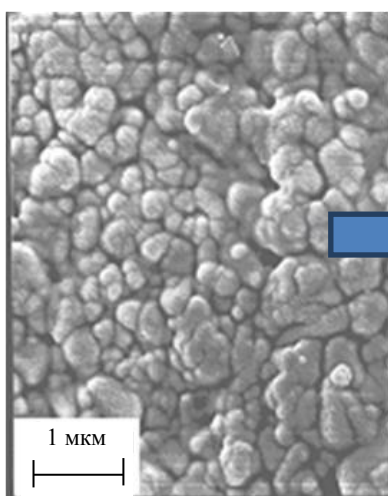
Производственный участок на ПАО УМПО и внутрикамерное размещение лопаток газотурбинного двигателя при ионно-лучевой обработке



Установка «Виктория-2» (а) и стойки и сегменты (б) направляющего аппарата ГПА АЛ-31СТ с покрытием $Ti + TiN$

Для повышения износостойкости металлообрабатывающего инструмента, применяемого в производстве ПАО НПО «Сатурн», создано современное автоматизированное оборудование для нанесения износостойких покрытий сложной структуры и состава в вакууме. Оно позволяет получать многослойные и наноструктурированные покрытия нитридов и карбидов металлов IV—VI групп периодической системы элементов Д.И. Менделеева.

Для применения в электрокардиостимуляторах, имплантируемых в человека, ведутся исследования по разработке технологии производства покрытий на электроды, которые устанавливаются непосредственно в сердце.



Фрактальное покрытие рабочего контакта электрода электрокардиостимулятора

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курчатов И.В. — Атомная энергия, 1958, № 5, с. 105.
2. Golovin I.N. — Inst. El. Engr. Part A, 1959, vol. 106, № 2, p. 95.
3. Головин И.Н., Артеменков Л.И., Богданов Г.Ф., Панов Д.А., Пистуневич В.И., Семашко Н.Н. — УФН, 1961, т. LXXIII, с. 685.
4. Богданов Г.Ф., Головин И.Н., Кучеряев Ю.А., Панов Д.А. — Ядерный синтез. Приложение, 1962, т. 1, с. 215.
5. Арсенин В.В., Жильцов В.А., Чуянов В.А. — In: 3d Intern. Conf. «Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research». Novosibirsk, 1968. — Vienna: IAEA, 1969, vol. 2, p. 515.
6. Feedback and Dynamic Control of Plasmas. Ed. by T.K. Chu and H.W. Hendel. — In: AIP Conf. Proc. № 1, N.-Y., 1970.
7. Арсенин В.В., Чуянов В.А. — УФН, 1977, т. 123, с. 83.
8. Zhiltsov V.A., Likhtenstein V.Kh., Panov D.A., Kosarev P.M., Chuyanov V.A., Shcherbakov A.G. — In: 5th Intern. Conf. «Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research». Tokyo, 1974. — Vienna: IAEA, 1975, vol. 1, p. 335.

9. Арсенин В.В., Жильцов В.А., Лихтенштейн В.Х., Чуянов В.А. — Письма в ЖЭТФ, 1968, т. 8, с. 69.
10. Chuynov V.A., Likhtenstein V.Kh., Panov D.A., Zhiltsov V.A. — In: AIP Conf. Proc. № 1 «Feedback and Dynamic Control of Plasmas». Ed. by T.K. Chu and H.W. Hendel. N.-Y., 1970, p. 188.
11. Панов Д.А. — Физика плазмы, 1983, т. 9, с. 184.
12. Belavin M.I., Golovin I.N., Zhiltsov V.A., Kosarev P.M., Kucheryaev Yu.A., Lickhtenstein V.Kh., Obysov V.A., Panov D.A., Skovoroda A.A., Tarabrin Yu.A., Shcherbakov A.G. — In: 12th Intern. Conf. «Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research». Nice, 1988. — Vienna: IAEA, 1989, vol. 2, p. 691.
13. Artemenkov L.I., Golovin I.N., Kozlov P.I., Melikhov P.I., Shvindt N.N., Butenko V.K., Gubarev V.F., Kukhtenko A.I., Ladikov-Roef Yu.P., Samoilenko Yu.I. — In: 4th Intern. Conf. «Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research». Madison, 1971. — Vienna: IAEA, 1971, vol. 1, p. 359.
14. Arsenin V.V., Artemenkov L.I., Ivanov N.V., Kakurin A.M., Molotkov L.I., Chudnovskij A.N., Shvindt N.N., Gvozdokov Yu.V., Cherkashin M.Yu. — In: 7th Intern. Conf. «Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research». 1978. — Nucl. Fusion Suppl., 1979, vol. 1, p. 233.
15. Артеменков Л.И., Попрядухин А.П., Чудновский А.Н. — Физика плазмы, 1983, т. 9, с. 343.
16. Беляев В.А., Дубровин М.М., Козлов Д.А., Терентьев А.А., Тренин А.Е., Шолин Г.В. — Физика плазмы, 2010, т. 36, с. 1024.
17. Беляев В.А., Козлов Д.А., Терентьев А.А., Тренин А.Е. — Физика плазмы, 2017, т. 43, с. 874.
18. Тимофеев А.В. — УФН, 1970, т. 102, с. 185.
19. Тимофеев А.В. Резонансные явления в колебаниях плазмы. Изд. 2-е. — М.: Физматлит, 2009.
20. Арсенин В.В. — В сб.: Итоги науки и техники. Физика плазмы. Под ред. В.Д. Шафранова. Т. 8. — М.: ВИНТИ, 1988, с. 49.
21. Kulygin V.M., Arsenin V.V., Zhiltsov V.A., Zvonkov A.V., Skovoroda A.A., Timofeev A.V. — Nucl. Fusion, 2007, vol. 47, p. 738.
22. Кулыгин В.М., Панасенков А.А., Семашко Н.Н., Чухин И.А. — ЖТФ, 1979, т. 49, вып. 1, с. 168.
23. Болдасов В.С., Кулыгин В.М., Свешников А.Г., Семашко Н.Н. — В сб.: Вычисл. методы и программирование. Вып. XXXI. — М.: Изд-во МГУ, 1979, с. 22.
24. Семашко Н.Н., Владимиров А.Н., Кузнецов В.В., Кулыгин В.М., Панасенков А.А. Инжекторы быстрых атомов водорода. — М.: Энергоиздат, 1981.
25. Kulygin V.M. — Plasma Devices and Operations, 1992, vol. 1, № 1, p. 277.
26. Kulygin V.M. — Plasma Devices and Operations, 1994, vol. 3, p. 181.
27. Владимиров А.Н., Кузнецов В.В., Кулыгин В.М., Никулин В.А., Панасенков А.А., Семашко Н.Н., Серегин В.С., Чухин И.А. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 1981, вып. 2(8), с. 27.
28. Кулыгин В.М., Лейтан В.А., Михайлов А.В., Рошаль А.С., Серегин В.С. — Там же, с. 76.
29. Кулыгин В.М., Панасенков А.А., Плешивцев Н.В., Семашко Н.Н. — Атомная энергия, 1997, т. 82, вып. 1, с. 23.
30. Kulygin V.M., Skovoroda A.A., Zhil'tsov V.A. — Plasma Devices and Operations, 1998, vol. 6 (1—3), p. 135.
31. Zhil'tsov V.A., Klimenko E.Yu., Kosarev P.M., Kulygin V.M., Platonov V.V., Semashko N.N., Skovoroda A.A., Ukhov V.P., Mehed'kin A.A. — Nucl. Fusion, 2000, vol. 40, p. 509.
32. Skovoroda A.A., Zhil'tsov V.A. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2001, vol. 43, p. 929.
33. Kulygin V.M., Dlougach E.D., Gorbunov E.P., Klimenko E.Yu., Mehed'kin A.A., Moskalenko I.V., Panasenkov A.A., Pustovoit Yu.M., Skovoroda A.A., Smirnov V.A., Zhil'tsov V.A., Zubarev V.F. — Nucl. Fusion, 2001, vol. 41, p. 355.
34. Belyaev V.A., Dubrovin M.M., Kosarev P.M., Kulygin V.M., Skovoroda A.A., Spitsyn A.V., Terent'ev A.A., Yanchenkov S.V., Zhil'tsov V.A., Zubarev V.F. — Plasma Devices and Operation, 2003, vol. 11, Issue 2, p. 103.
35. Belyaev V.A., Dubrovin M.M., Kosarev P.M., Skovoroda A.A., Spitsyn A.V., Terent'ev A.A., Yanchenkov S.V., Zhil'tsov V.A., V.F. Zubarev V.F. — Fusion Science and Technology, 2005, vol. 47, p. 124.
36. Spitsyn A.V., Golubeva A.V., Bobyr N.P., Khripunov B.I., Cherkez D.I., Petrov V.B., Mayer M., Ogorodnikova O.V., Alimov V.K., Klimov N.S., Putrik A., Chernov V.M., Leontieva-Smirnova M.V., Gasparyan Y.M., Efimov V.S. — J. Nucl. Mater., 2014, vol. 455, p. 561.
37. Spitsyn A., Pisarev A., Skovoroda A., Gureev V., Martynenko Yu. — J. Nucl. Mater., 2007, vol. 363—365, p. 833.
38. Артемов А.В., Жильцов В.А., Крутяков В.А., Иванов М.Н., Переславцев А.В., Петрова М.В., Тимофеев А.В., Шеляков О.В. — ВАНТ. Сер. Плазменная электроника и новые методы ускорения, 2008, № 4, с. 150.
39. Жильцов В.А., Кудрявцев Е.Г., Кулыгин В.М., Орлов В.В., Рачков В.И., Семашко Н.Н., Сковорода А.А., Смирнов В.П., Тимофеев А.В. — Атомная энергия, 2006, т. 101, с. 302.
40. Тимофеев А.В. — УФН, 2014, т. 184, с. 1101.
41. Ковальчук М.В., Ильгисонис В.И., Кулыгин В.М. — Природа, 2017, № 12, с. 33.
42. Gnedenko V.G., Ivanov A.F., Pereslavl'tsev A.V., Tresviatsky S.S. — ВАНТ. Сер. Плазменная электроника и новые методы ускорения, 2006, № 5, с. 75.
43. Kulygin V.M., Pereslavl'tsev A.V., Tresvyatskii S.S. — Technical Physics, 2017, vol. 62, p. 1327.
44. Воцинин С.А., Бульба В.А., Острый И.И., Переславцев А.В., Тресвятский С.С. — Российский химический журнал, 2010, т. LIV, № 6, с. 3.
45. Воцинин С.А., Артемов А.В., Переславцев А.В., Кулыгин В.М. — Твердые бытовые отходы, 2017, № 8, с. 28.
46. Бобраков А.Н., Крутяков Ю.А., Кудринский А.А., Переславцев А.В., Ширяевский В.Л. — Экология и промышленность России, 2013, № 9, с. 46.
47. Бобраков А.Н., Кудринский А.А., Переславцев А.В., Ширяевский В.Л. — Экология и промышленность России, 2014, № 4, с. 4.



Владимир Васильевич Арсенин, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Отделение плазменных технологий ККФХТ, лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Arsenin_VV@nrcki.ru



Валерий Александрович Жильцов, начальник лаборатории, Отделение плазменных технологий ККФХТ, многократный лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Владимир Михайлович Кулыгин, заместитель руководителя, Отделение плазменных технологий ККФХТ, к.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности, почётный работник науки и техники РФ; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Kulygin_VM@nrcki.ru



Олег Иосифович Обрезков, к. техн. н., начальник лаборатории, Отделение плазменных технологий ККФХТ, лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Александр Васильевич Переславцев, к. техн. н., начальник лаборатории, Отделение плазменных технологий ККФХТ, Заслуженный работник атомной промышленности РФ, ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Александр Викторович Спицын, к.ф.-м.н., начальник лаборатории, Отделение плазменных технологий ККФХТ; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия

Статья поступила в редакцию 28 апреля 2018 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 2, с. 13—22.