

УДК 621.039.6:533.9

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-6-31-43

Физико-технические проблемы управляемого термоядерного синтеза

В.П. Афанасьев, В.П. Будаев, А.В. Дедов, А.В. Елецкий, А.Т. Комов, В.М. Кулыгин, А.В. Лубенченко, С.Д. Федорович, Ши Нгуен-Куок

Приведен краткий обзор направлений научной деятельности и результатов исследований, проводимых на кафедре общей физики и ядерного синтеза (ОФиЯС). Основная направленность работ связана с проблемами управляемого термоядерного синтеза и плазменных технологий.

Изучаются теплообмен и гидродинамика в обращенных к плазме элементах конструкций термоядерных реакторов, где односторонний нагрев приводит к существенно неравномерному распределению плотности теплового потока и температуры стенки по внутреннему периметру трубы. Проводятся экспериментальные исследования пузырькового кипения и режимов теплообмена в сильно недогретом потоке; интенсифицированного теплообмена в кольцевых каналах и моделях шаровых засыпок с микровзлами; интенсификации теплообмена применительно к задачам охлаждения ИТЕР. Создан крупномасштабный стенд по исследованию тепло-гидравлических процессов в моделях перспективных тепловыделяющих сборок ядерных реакторов при параметрах реактора ВВЭР. Ведутся работы по исследованию стойкости тугоплавких материалов под действием мощных плазменно-тепловых потоков, ожидаемых в термоядерном реакторе, — токамаке. На сооруженной плазменной установке с линейной мультикаскадной магнитной системой с уникально высокими параметрами испытываются материалы горячей плазмой мегаваттного масштаба. Уникальное плазменное устройство было сконструировано для изучения взаимодействия плазмы с поверхностью и высокотемпературного плазменного тестирования тугоплавких металлов, таких как вольфрам, молибден, сталь и др. В ходе экспериментов планируется разработать новую технологию высокопористой структуры поверхности тугоплавкого металла, включая вольфрамовый «пух». Подобные исследования актуальны для изобретения новых материалов, представляющих значительный интерес для ядерных, химических, энергетических и биомедицинских технологий.

Основные направления работ по нанотехнологиям связаны с получением, исследованием и прикладным использованием углеродных наноструктур, таких как фуллерены, углеродные нанотрубки, графен, и их производных. Рассматривается задача явления упрочнения зависимости степени упрочнения стальной поверхности от типа и интенсивности падающего облучения, а также от типа наноуглеродного материала. Исследуется взаимодействие заряженных частиц и излучения с конструкционными материалами, для решения проблем рассеяния ионных пучков в неоднородных средах, продолжается экспериментальное и теоретическое изучение процессов взаимодействия электронов и легких ионов с неоднородными твердыми телами. Развиваются инновационные методы разрушающего и неразрушающего анализа тонких пленок, в том числе послыйный анализ. На кафедре построены уникальные плазменные установки: высокочастотный индукционный плазматрон для химического спектрального анализа; дуговой плазматрон для изучения процессов свободного горения плазмы; высоковольтная установка для исследования стримерного и дугового разрядов с электролизом; установка холодной плазмы для изучения воздействия разряда на биологические ткани. С их помощью успешно проводятся как научно-исследовательские, так и лабораторные студенческие работы.

Ключевые слова: теплообмен, гидродинамика, термоядерный синтез, нанотехнологии.

Для цитирования: Афанасьев В.П., Будаев В.П., Дедов А.В., Елецкий А.В., Комов А.Т., Кулыгин В.М., Лубенченко А.В., Федорович С.Д., Ши Нгуен-Куок. Физико-технические проблемы управляемого термоядерного синтеза // Вестник МЭИ. 2017. № 6. С. 31—43. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-6-31-43.

The Physical and Technological Problems of Controlled Thermonuclear Fusion

V.P. Afanas'ev, V.P. Budaev, A.V. Dedov, A.V. Elets'kii, A.T. Komov, V.M. Kulygin, A.V. Lubenchenko, S.D. Fedorovich, Shi Nguyen-Kuok

The lines of scientific activity and the results of investigations carried out at the MPEI Department of General Physics and Nuclear Fusion are briefly reviewed. The conducted activities are mainly focused on the problems of controlled thermonuclear fusion and plasma technologies.

Efforts are taken to study heat transfer and hydrodynamics in the plasma-facing structural components of thermonuclear reactors, one-sided heating of which results in essentially nonuniform distributions of heat flux density and wall temperature over the pipe inner perimeter. Another line of research activities is concerned with experimental investigations of nucleate boiling and heat transfer in essentially subcooled flow, of enhanced heat transfer in annular channels and models of pebble fuel element beds, and of heat transfer enhancement as applied to the problems concerned with cooling the International thermonuclear experimental reactor (ITER). A large-scale test bench for studying thermal-hydraulic processes in the models of advanced nuclear fuel assemblies operating with the parameters of a VVER-type reactor has been constructed.

Activities are underway on studying the resistance of refractory metals to the effect of powerful plasma and heat fluxes expected to take place in a tokamak-type thermonuclear reactor. A plasma installation equipped with a linear multicusp magnetic system featuring uniquely high parameters has been constructed, which is used to perform tests of materials exposed to megawatt-scale hot plasma. The unique plasma installation has been constructed for studying plasma-to-surface interaction and high-temperature plasma testing of refractory materials like tungsten, molybdenum, steel, etc. The experiments to be performed on the installation are aimed at developing a new technology for producing a highly porous surface nanostructure of refractory metal, including tungsten “fuzz”. Such investigations are topical for inventing new materials that are of considerable interest for nuclear, chemical, power, and biomedical technologies.

The main lines of activities on nanotechnologies include obtaining, studying and using carbon nanostructures such as fullerenes, carbon nanotubes, graphene, and their derivatives. Within the framework of studying the strengthening phenomenon, the extent of steel surface strengthening as a function of the type and intensity of incident radiation, and the type of nanocarbon material is considered. The interaction of charged particles and radiation with structural materials is investigated. Experimental and theoretical investigations of the interaction of electrons and light ions with inhomogeneous solid bodies are continued to solve the problems concerned with scattering ion beams in inhomogeneous media. Innovative methods for destructive and non-destructive analysis of thin films are developed, including layer-wise analysis techniques. Unique plasma installations have been constructed at the department, such as a high-frequency induction plasmatron for carrying out chemical spectral analysis, an arc plasmatron for studying the free plasma burning processes, a high-voltage installation for studying streamer and arc discharges with electrolysis, and a cold plasma installation for studying the effect of discharge on biological tissues. All these installations are successfully used for carrying out both research activities and student training laboratory works.

Key words: heat transfer, hydrodynamics, thermonuclear fusion, nanotechnologies.

For citation: Afanas'ev V.P., Budaev V.P., Dedov A.V., Elets'kii A.V., Komov A.T., Kulygin V.M., Lubenchenko A.V., Fedorovich S.D., Shi Nguyen-Kuok. The Physical and Technological Problems of Controlled Thermonuclear Fusion. MPEI Vestnik. 2017; 6:31—43. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2017-6-31-43.

Введение

Исследования по управляемому термоядерному синтезу были начаты в октябре 1950 г., когда состоялось первое обсуждение реальности задачи с участием И.Е. Тамма, А.Д. Сахарова, И.Н. Головина и других выдающихся физиков. Эти работы дали мощный стартовый импульс развитию нового раздела физики — физики плазмы. Основным направлением исследований по мирному использованию «термояда» стало создание термоядерного источника электроэнергии. В настоящее время работы вышли на «финишную прямую»: разработан проект и ведется сооружение международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР (ITER). Отечественные специалисты принимали самое активное участие в разработке его концепции и проектировании.

На кафедре общей физики и ядерного синтеза (ОФиЯС) НИУ «МЭИ» со дня ее основания в 1979 г. развиваются научные направления, адаптированные к проблемам управляемого термоядерного синтеза и плазменных технологий. Исследования проводятся по следующим направлениям: теплообмен и гидродинамика в оборудовании термоядерных реакторов и установок; создание и испытание материалов для термоядерного реактора; изучение материалов, обращенных к плазме. Научная деятельность сотрудников кафедры протекает в рамках созданных лабораторий по перечисленным направлениям.

Теплообмен и гидродинамика в обращенных к плазме элементах конструкций термоядерных реакторов

К 1986 г. на кафедре «Физика-2» сформировался достаточно большой коллектив теплофизиков и ее

заведующий, доктор физико-математических наук, профессор Н.Н. Семашко при поддержке института атомной энергии им. И.В. Курчатова принял решение о создании нового направления научной работы по исследованиям теплогидравлических задач в условиях предельно высоких плотностей энергии, достигающих чудовищных значений в теплонапряженных узлах термоядерного реактора порядка 10^2 МВт/м². Под руководством профессора, доктора технических наук А.Т. Комова в течение нескольких лет был создан экспериментальный стенд, моделирующий условия конструктивных элементов, обращенных в плазму. На этом стенде в течение 15 лет проводили цикл экспериментальных исследований, результатом которых стала возможность безаварийного теплоотвода от фрагмента трубы калориметра инжектора быстрых нейтральных атомов при рекордно высокой плотности энергии пучка заряженных частиц, достигающей $78,3$ МВт/м². При тесном содружестве с профессором В.В. Яговым была разработана модель теплообмена при однофазном теплообмене и кипении в условиях одностороннего нагрева закрученного потока, недогретого до температуры насыщения [1]. Односторонний нагрев приводит к существенно неравномерным распределениям плотности теплового потока и температуры стенки по внутреннему периметру трубы. Также особенностью, выявленной при экспериментальном исследовании пузырькового кипения в сильно недогретом потоке, является то, что его развитие происходит плавно, без резкой смены режимов теплообмена. Типичные зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока представлены на рис. 1, откуда следует, что можно отводить стационарно 20 МВт/м² без изменения в режиме теплообмена.

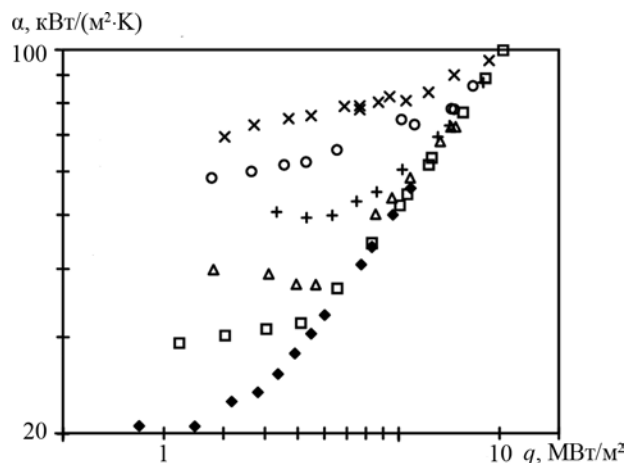


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока для рабочего участка диаметром 8 мм при $p = 1,0$ МПа, $k = 0,90$, $x = -0,32$:

$\rho w = 1100$ (◆), 2200 (□), 4300 (△), 6600 (+), 8700 (○), 10900 (×), $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$

В настоящий момент в коллективе ведутся работы по экспериментальному моделированию охлаждения дисперсным потоком лимитеров жидкого лития.

Полученный опыт интенсификации теплообмена применительно к задачам охлаждения ИТЕР воплотился в создании крупномасштабного стенда по исследованию теплогидравлических процессов в моделях перспективных тепловыделяющих сборок ядерных реакторов при параметрах реактора ВВЭР. Были получены результаты исследования интенсифицированного теплообмена в кольцевых каналах [2] и моделях шаровых засыпок с микровзлами [3]. Всего научной группой А.Т. Комова опубликовано более 120 статей и докладов, защищены две докторские и пять кандидатских диссертаций.

Материалы для термоядерного реактора

Испытание тугоплавких металлов международного термоядерного реактора ИТЭР

В 2016 г. на кафедре ОФиЯС создана лаборатория инновационных технологий материалов термоядерных реакторов. В ней проводятся работы по исследованию стойкости тугоплавких материалов под действием мощных плазменно-тепловых потоков, ожидаемых в термоядерном реакторе-токамаке. Начато сооружение плазменной установки с линейной мультикасповой магнитной системой с уникально высокими параметрами для обработки материалов высокоэнергичными потоками стационарной горячей плазмы мегаваттного масштаба. Запуск установки в эксплуатацию запланирован в 2017 г.

Целью работ является испытание тугоплавких металлов (вольфрам, молибден, титан, нержавеющей сталь и др.) плазменно-тепловыми нагрузками мегаваттного масштаба [4], разработка технологии

получения уникальной высокопористой структуры поверхности тугоплавких металлов с размером пор и нановолокон до 50 нм, получение вольфрамового «пуха» (fuzz), технологии турбулентного нагрева плазмы и плазменного двигателя.

Тугоплавкие металлы с высокопористой поверхностью необходимы:

- для эксплуатации при экстремальных тепловых и плазменно-пучковых нагрузках [4], в том числе для термоядерных и атомных реакторов;
- пористый вольфрам можно использовать для управления турбулентности плазмы путем ВЧ-модуляции неустойчивостей для управления плазмы в ИТЭР и других токамаках-реакторах;
- для покрытия обтекаемых поверхностей летательных аппаратов с целью уменьшения аэродинамического сопротивления при сверхзвуковых и гиперзвуковых скоростях;
- для синтеза новых наноструктурных материалов с заданными функциональными свойствами и металлорганосиликатных композитных материалов;
- в качестве катализаторов для водородной энергетики;
- для применения в биотехнологии и биомедицине.

Изменение материальной поверхности стенок под действием плазмы в термоядерных установках (ТУ) происходит под влиянием нескольких механизмов, включая процессы эрозии, плавления и движения расплава по поверхности, переосаждения материалов эрозии, отверждения и рекристаллизации [4–8]. В результате на поверхности формируется стохастическая структура, меняются теплофизические свойства материала. Для описания структуры следует привлекать экспериментальные данные о свойствах самоподобия — скейлингах самоподобия (степенных законах масштабной инвариантности) стохастической поверхности. Необходимо из эксперимента определить наиболее общие степенные законы кластеризации поверхности, что позволит продвинуться в описании и систематизации свойств материалов после облучения плазмой в ТУ и предсказать поведение материалов при плазменной нагрузке в термоядерных реакторах. Агломерация имеет различные спектры в зависимости от свойств автомодельности — самоподобия процесса (для числа частиц N с массой m : $N(m) = Cm^{-(3+\eta)/2}$, η определяется свойствами самоподобия), что можно использовать для классификации экспериментальных данных и построения модели процесса фрагментации-агрегации и эрозии материалов в условиях воздействия горячей плазмы. Проведены исследования свойств самоподобия стохастической кластеризации различных материалов (вольфрама, углерода, нержавеющей стали) после воздействия горячей плазмы в установках токамак Т-10, плазменном ускорителе КСПУ-Т, линейной установке НАГДИС-II [4–8]. Данные мате-

риалы имеют шероховатую стохастическую структуру поверхности с разными масштабами гранулярности, начиная от нанометров. Количественные характеристики стохастических рельефов определялись методом спектрального и статистического анализа экспериментальных профилей. Это позволило характеризовать качественное отличие стохастической кластеризации образцов после обработки высокотемпературной плазмы от шероховатых поверхностей, образованных в иных условиях. Фурье-спектры профилей рельефа описывают распределение высот (размеров структур на поверхности) по масштабам. Спектры уширены, без резонансов, что указывает на отсутствие доминирующих периодических структур в рельефе и свойство самоподобия. Функциональную зависимость фурье-спектра от волнового числа k можно характеризовать степенным законом $S(k) \sim k^p$. Для образцов вольфрама [8], нержавеющей стали [7] и графита [6] после воздействия высокотемпературной плазмой в термоядерных установках величина показателя p варьируется в диапазоне от $-2,4$ до $-2,8$ и более, а для сравнительных образцов, не обработанных высокотемпературной плазмой, — от $-1,97$ до $-2,2$ [8].

Статистические свойства самоподобия стохастической структуры описываются функцией распределения (ФР) высот рельефа образца. Для образцов после воздействия высокотемпературной плазмой ФР типично имеет «тяжелые» хвосты и не описывается гауссовским (нормальным) законом, что свидетельствует о нетривиальном самоподобии. Для сравнения, ФР высот образца отливки промышленной стали, шероховатая поверхность которой сформировалась при отверждении после плавления, близка к гауссовой функции — свидетельство о простейших статистических свойствах кластеризации. Для различных тугоплавких материалов впервые была обнаружена схожая неоднородная стохастическая кластеризация поверхности со свойствами самоподобия структуры гранулярности от нано- до макромасштабов, что, возможно, указывает на универсальные механизмы формирования стохастической кластеризации материалов под влиянием высокотемпературной плазмы. Выявленные степенные законы могут быть использованы при описании и систематизации симметрий масштабной инвариантности твердых тел и агломератов.

Поверхностное упрочнение металлов углеродными наноструктурами с последующей обработкой высокоэнергетичными источниками

В 2015 г. на кафедре ОФиЯС была создана лаборатория нанокремниевых материалов (ЛНУМ). Основные направления работ, проводимых в соответствии с грантами Российского научного фонда (РНФ) и госзаданиями, связаны с получением, исследованием и прикладным использованием углеродных наноструктур, таких как фуллерены, углеродные нанотрубки, графен, и их производных.

Эксперименты, выполненные в 2003 — 2005 гг. показали, что покрытие стальной поверхности нанокремнием с последующей обработкой высокоинтенсивными источниками энергии (лазерный луч, электронный и ионный пучки) приводит к увеличению микротвердости обработанной поверхности. В 2016 г. в рамках проекта, поддержанного РНФ, поставлена задача детального исследования явления упрочнения. С этой целью исследованы зависимости степени упрочнения стальной поверхности от типа и интенсивности падающего облучения, а также от типа нанокремниевых материалов. Результаты исследований показали, что при оптимальных условиях в случае использования лазерного облучения достигается более чем шестикратное увеличение микротвердости и полутора–двукратное снижение коэффициента трения обработанной поверхности. В случае электронно-лучевой обработки эффект упрочнения несколько ниже (2–3 раза), однако глубина упрочненного слоя оказывается в несколько раз больше.

На рис. 2 приведены зависимости микротвердости поверхности малоуглеродистой стали от энергии лазерного и электронно-лучевого облучения [9]. В качестве нанокремниевых материалов использовались сажа, полученная в дуговом разряде с графитовыми электродами в атмосфере He, остающаяся после экстракции фуллеренов. Наличие максимумов на этих зависимо-

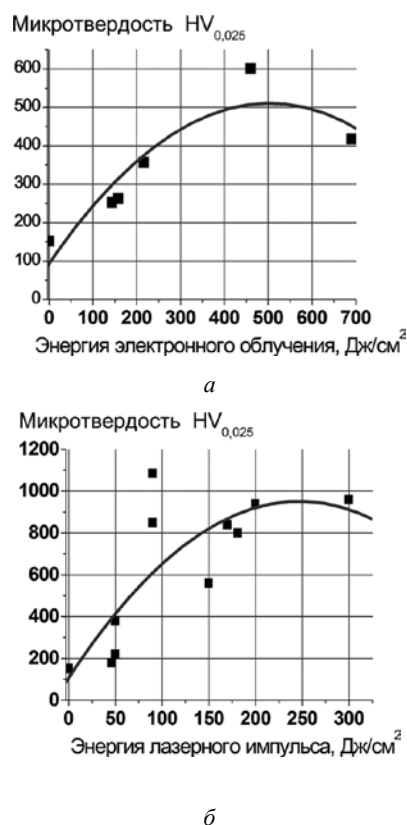


Рис. 2. Зависимости микротвердости поверхности малоуглеродистой стали от энергии лазерного (а) и электронно-лучевого (б) облучения

стях указывает на возможность оптимизации процесса упрочнения. В дальнейшем планируется продолжить исследование с использованием в качестве наноуглеродных покрытий такие материалы, как фуллерены, углеродные нанотрубки различной геометрии и оксид графена на различных стадиях восстановления.

Термическое восстановление оксида графена

Графен, обладающий уникальными физико-химическими характеристиками, представляет значительный интерес как для исследователей, так и для специалистов в области получения новых материалов. В настоящее время во многих лабораториях мира предпринимаются интенсивные усилия, направленные на использование графена в качестве основы для проводящих электродов нанoeлектронных систем, несущего элемента в электрокатализе, химического и биологического сенсора, а также для систем получения, преобразования и хранения энергии. Наряду с этим он рассматривается как эффективная присадка к нанокompозитным материалам на основе полимеров, способная изменить механические и электрические характеристики материала. Успешное развитие этих и других перспективных направлений использования графена возможно при условии разработки эффективных, технически несложных и недорогих способов его получения.

Как известно, наиболее высокое качество графеновых образцов достигается при процедуре микромеханического расщепления кристаллического графита. Именно такие образцы отличаются рекордными значениями подвижности электронов, что связано с их бездефектной структурой. Однако данный метод имеет весьма низкую эффективность и вряд ли подходит для масштабных применений графена. Наиболее распространен подход, основанный на методе Хаммерса [10], который уже много лет используется для синтеза оксида графена из мелкодисперсного графита. Для последующего восстановления оксида графена применяется химический метод [11], базирующийся на использовании водородосодержащих реагентов (например, гидразина) в качестве восстановителя, либо термический метод [12], при котором восстановление оксида графена является результатом термообработки. При этом применение термического метода более предпочтительно, поскольку, с одной стороны, химические реагенты, используемые при химическом восстановлении графена, представляют экологическую опасность для человека и окружающей среды, а с другой стороны — процедура химического восстановления оксида графена сопровождается образованием структурных дефектов, оказывающих негативное влияние на физико-химические свойства графеновых листов. В связи с этим в ЛНУМ были предприняты исследования динамики термического восстановления оксида графена с целью изучения основных особенностей процесса и оптимизации самой процедуры восстановления.

В качестве объекта исследования взяты бумагоподобные образцы оксида графена (ОГ) толщиной 3...5 мкм, шириной 10...15 мм и длиной 15...25 мм. Термическая обработка образцов оксида графена проводилась в высокотемпературной печи установки planarGROW-2S производства компании PlanarTech. Индикатором степени восстановления служила электропроводность образцов, значение которой возрастала по мере увеличения температуры термообработки. Зависимость электропроводности образцов от температуры термообработки показана на рис. 3. [13]. Как видно из зависимости, представленной на рис. 2, наиболее существенное изменение проводимости восстановленного ОГ (ВОГ) наблюдается в интервале температур между 100 и 200 °С. В этом диапазоне проводимость образцов возрастает примерно на пять порядков величины от 10^{-3} до 10^2 См/м. Дальнейший отжиг материала ведет к существенно более плавному возрастанию проводимости. При этом максимально достигнутое значение проводимости восстановленного оксида графена (~ 3500 См/м) примерно на порядок ниже табличного значения проводимости графита. Однако если учесть, что плотность материала, подвергнутого термообработке при температуре 800 °С, составляет около $0,5 \text{ г/см}^3$, что примерно в 4,5 раза ниже плотности графена, то получается, что проводимость материала в расчете на один графеновый слой лишь вдвое уступает соответствующему значению для графита.

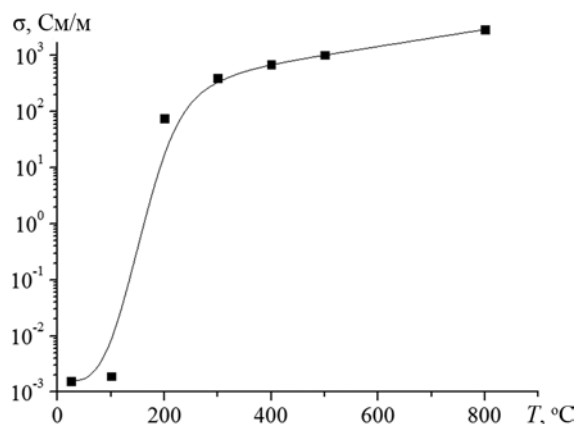


Рис. 3. Зависимость удельной проводимости образцов ВОГ от температуры термообработки

На рис. 4 приведена зависимость плотности образцов от температуры термообработки. Как видно, нагрев до 800 °С приводит к уменьшению плотности образца примерно в 2,4 раза — от 1,2 до $0,5 \text{ г/см}^3$. Снижение плотности образцов по мере увеличения температуры термообработки обусловлено удалением кислорода. Обработка данных, представленных на рис. 3, позволила сделать вывод о том, что кислород удаляется из образца в связанном состоянии в виде соединения СО.

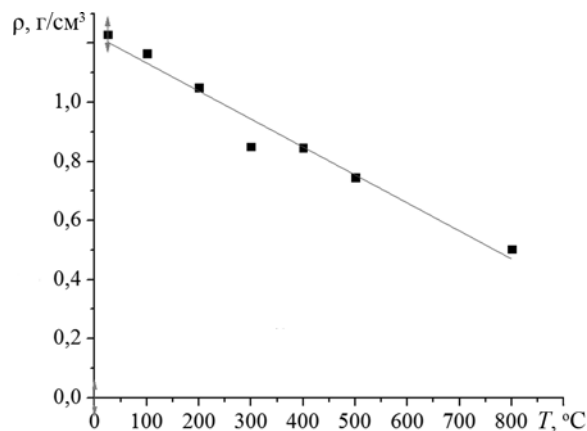


Рис. 4. Зависимость плотности образцов ВОГ от температуры термообработки

Измерения электрических характеристик образцов оксида графена на различной стадии восстановления указывают на неомический характер проводимости этих образцов [14]. Это проявляется в зависимости проводимости образцов от приложенного напряжения. Исследования показали, что рост проводимости образцов с ростом приложенного напряжения обусловлен перколяционным характером проводимости материала, согласно которому перенос заряда осуществляется по проводящим каналам, образованным фрагментами ВОГ, контактирующими друг с другом. При этом зависимость проводимости образцов от приложенного напряжения обусловлена наличием неидеальных контактов, сопротивление которых падает по мере роста напряжения. Полученные экспериментальные данные описываются в рамках простой модели, согласно которой проводимость материала зависит от соотношения между проводимостью контакта и проводимостью фрагментов ВОГ. Указанное соотношение изменяется по мере увеличения температуры обработки образцов, что проявляется на форме зависимости степени чувствительности проводимости к величине приложенного напряжения от температуры термообработки. На рис. 5 изображено сравнение зависимостей степени чувствительности проводимости образцов к величине приложенного напряжения от температуры термообработки, полученных на основании измерений вольт-амперной характеристики образцов и простой теории проводимости, развитой в рамках перколяционной модели.

Усиление сигнала комбинационного рассеяния света углеродными нанотрубками

Благодаря тому, что углеродные нанотрубки (УНТ) проводят электричество и имеют рекордное значение отношения длины к диаметру, можно рассчитывать на получение значительного эффекта усиления сигнала комбинационного рассеяния света (КРС) вблизи наконечника УНТ. Этот эффект, известный как SERS (Surface Enhanced Raman Scattering), используется для

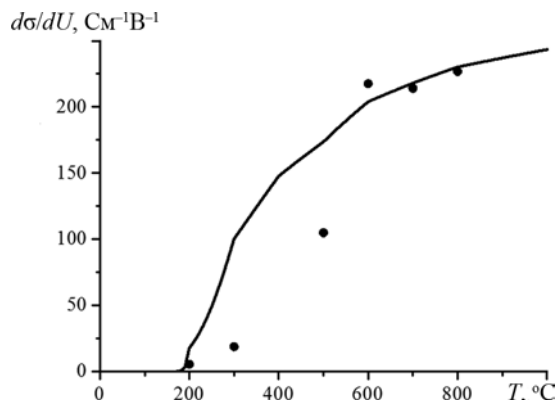


Рис. 5. Зависимость степени чувствительности проводимости образцов к величине приложенного напряжения от температуры термообработки, полученные на основании измерений вольт-амперной характеристики образцов (точки) и вычисленные в рамках перколяционной модели (линия). Точки получены в результате усреднения большого количества экспериментальных данных для разных образцов

определения малых молекулярных примесей в веществе, а также в медицине для установления молекулярного состава определенных областей человеческого организма. В ЛНУМ в рамках госзадания была поставлена задача обнаружения эффекта усиления сигнала КРС углеродными нанотрубками, выращенными на установке planarGROW-2S производства компании PlanarTech. Результаты предварительных экспериментов показаны на рис. 6, где сравниваются спектры КРС молекул воды, полученные в отсутствие УНТ (1) с соответствующими спектрами, измеренными в присутствии УНТ, синтезированных с помощью катализаторов двух типов. В случае использования УНТ одного из типов наблюдается заметный эффект усиления сигнала КРС. Незначительное по меркам SERS усиление объясняется тем, что доля молекул воды, находящихся в окрестности наконечника нанотрубок и подверженных усилению, весьма мала по сравнению с общей массой воды, являющейся источником сигнала КРС.

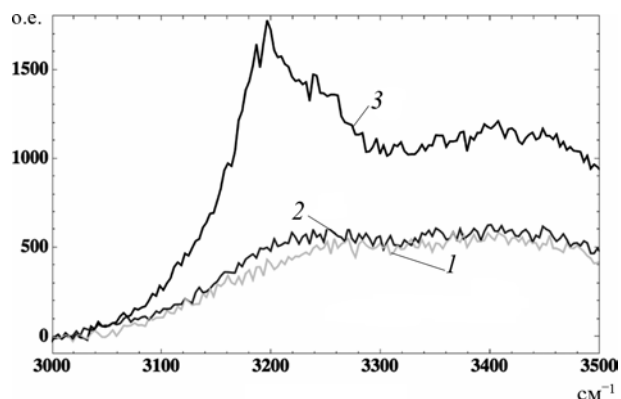


Рис. 6. Спектры КРС воды в отсутствие УНТ (1) и в присутствии УНТ, синтезированных с помощью катализатора типов А (2) и В (3).

В самом деле, как следует из экспериментов [15 — 18], эффект усиления сигнала КР реализуется на расстоянии от усиливающего объекта не более 40 нм. Тем самым объем воды, подверженный эффекту усиления, составляет порядка $V_a \sim 10^{-16}$ см³. Это составляет примерно 10^{-14} от объема капли воды ($V_w \approx 0,02$ см³), являющейся объектом усиления. Если считать, что основной механизм усиления сигнала КР связан с эффектом электростатического усиления электрического поля протяженными проводящими объектами, какими являются углеродные нанотрубки, то коэффициент усиления электрического поля в окрестности наконечника УНТ будет равен $\alpha \approx L/D$ (отношение длины к диаметру) [16—20]. Коэффициент усиления сигнала КР пропорционален α^4 [21—24], что для нанотрубок с $\alpha \approx 10^3$ составляет величину порядка 10^{12} . Однако указанный результат следует умножить на отношение объемов $V_a/V_w \sim 10^{-14}$ и на число нанотрубок NCNT, вносящих вклад в эффект усиления. Характерное расстояние между нанотрубками в данном случае около 1 мкм, поэтому в условиях нашего эксперимента, когда диаметр пятна, создаваемого лазером, также порядка 1 мкм, величина NCNT составит порядка единицы. Таким образом, результат измерений на 2-3 порядка величины превышает результат выполненной здесь простой оценки. Таким образом, коэффициент усиления электрического поля в окрестности УНТ в несколько раз превышает значение 10^3 , принятое при выполнении данной оценки.

Взаимодействие заряженных частиц и излучений с конструкционными материалами

Одной из первых на кафедре была создана научная группа под руководством В.П. Афанасьева для решения проблем рассеяния ионных пучков в неоднородных средах. Профессор, доктор физико-математических наук В.П. Афанасьев успешно продолжает экспериментально и теоретически изучать процессы взаимодействия электронов и легких ионов с неоднородными твердыми телами. Его научной группой опубликовано более сотни научных работ, защищены две докторские и десять кандидатских диссертаций.

Развитие методов анализа поверхности

В качестве основного инструмента для анализа использовались спектры, полученные на установках электронной спектроскопии. Совместно с коллегами из института физики плазмы им. М. Планка (Германия) удалось провести исследования в рамках тритиевой проблемы термоядерных установок, в которых графит использовался в качестве материала, обращенного к плазме [25, 26]. Создана методика, позволившая на основе методов характеристических потерь энергии (ХПЭ) и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) выполнить количественный анализ изотопов водорода в углеводородных покрытиях термоядерных устройств, возника-

ющих вследствие процессов химического распыления углерода. Полученные результаты явились важным дополнением к данным, полученным на основе метода ядерных реакций [25].

Анализ литературных данных указал на опережающее развитие элементной базы электронной спектроскопии по сравнению с развитием методов анализа спектров, созданием методик, позволяющих количественно выполнять неразрушающий послойный анализ. Существующие программные продукты, такие как Casa XPS [27], базируются на теоретических представлениях, игнорирующих процессы упругого рассеяния [28]. Созданная в 1980-е годы теория учитывает процессы упругого рассеяния либо на чрезвычайно грубом транспортном приближении [29], либо на методах имитационного или монтекарловского (МК) моделирования [30]. Метод Монте-Карло не создает нормальных условий решения обратных задач на основе процедуры подбора, способной решить некорректную с математической точки зрения задачу в условиях слабой обусловленности. Сложившаяся ситуация заставила научную группу создать принципиально новую методику анализа спектров ЭС. В ее основу заложено представление энергетических спектров РФЭС, Оже-спектров, энергетических спектров ХПЭ и т. д. в виде ряда

$$F(\tau, \Delta, \mu_0, \mu, \varphi - \varphi_0) = \sum_{m=0}^l \sum_{k=0}^{\infty} (2 - \delta_{m0}) F_k^m(\tau, \mu_0, \mu) \cos(m(\varphi - \varphi_0)) x_{in}^k(\Delta), \quad (1)$$

$$F = R, T, Q, A,$$

где R, T — функции отражения и пропускания; Q, A — функции плотности потоков фото- и Оже-электронов; $\tau = z/l_{tot}$ — толщина исследуемого слоя в длинах полного пробега между соударениями; Δ — потеря энергии; $\theta_0 = \arccos \mu_0$ — полярный угол, определяющий направление зондирования мишени по отношению к нормали мишени z , направленной в глубину слоя; $\theta = \arccos \mu$ — угол визирования потока электронов; φ — азимутальный угол между направлениями зондирования и рассеяния; $x_{in}(\Delta)$ — нормированное сечение неупругого рассеяния; $x_{in}^k(\Delta) = x_{in}^{k-1}(\Delta) \otimes x_{in}^1(\Delta)$ — k -кратная свертка сечений; $x_{in}^k(\Delta)$ — определяет вероятность потери энергии Δ в результате k неупругих соударений.

Для функций $F_k^m(\tau, \mu_0, \mu)$ на основе решения граничных задач для уравнений переноса как с внутренними источниками (для Q и A), так и без них (для R и T), методом инвариантного погружения получена система уравнений [31—42]. Она допускает матричное представление и последующее численное решение. Время расчетов функций (1) по созданным программам не занимает промежуток времени, превышающий 1 с, что является определяющим фактором для определения характеристик исследуемых объектов на основе проце-

дуры подбора. Представление (1) называется методом парциальных интенсивностей и активно используется для расчетов энергетических спектров ЭС другими научными коллективами [43, 44].

Важным результатом по праву можно считать развитие методов решения системы уравнений для функций (1) на основе малоуглового приближения и метода сферических гармоник (МСГ). В работах [39, 40] представлен альтернативный используемому в [43] метод аналитического продолжения подынтегральных функций в уравнениях для функций отражения, что является необходимой процедурой для эффективной реализации МСГ. Данный метод позволил значительно повысить точность малоугловых расчетов.

Важным результатом работы стало решение проблемы так называемых *intrinsic excitation* или существования механизма потерь энергии, специфического исключительно для РФЭС. В работах [33—38, 41] показано, что экспериментально зафиксировать потери на *intrinsic excitation* на образцах из Be, Al, Si, Mg, Nb, W не представляется возможным.

Поскольку существующие методы анализа спектров РФЭС основаны на теории, полностью игнорирующей процесс упругого рассеяния [28, 45], то поставлена задача проведения подробного анализа физических эффектов, возникающих при последовательном учете явления многократного упругого рассеяния электронов. Были определены два основных эффекта: поворота тела яркости [32, 34] и подстилающей поверхности [46]. Установлен масштаб их влияния как на методах анализа, основанных только на анализе пиков РФЭС, сформированных электронами, вышедшими в вакуум без неупругих потерь энергии, так и на быстро развивающихся в настоящее время методиках, где анализируется спектр РФЭС в широком интервале потерь энергии.

Также актуально изучение процессов, происходящих с вольфрамом и бериллием в условиях термоядерных реакторов. Указанные работы проводятся совместно с Австрийским институтом прикладной физики и немецким энергетическим институтом (Institut für Energie und Klimaforschung – Plasmaphysik, Forschungszentrum Jülich, Germany). Созданные в научной группе методы анализа поверхности позволят получить важную информацию об исследуемых образцах на базе доступных, серийно выпускаемых экспериментальных установок, реализующих методики ЭС. Заметим, что результаты выполненных исследований представляют интерес не только для решения сложнейшего инженерного вопроса — «проблемы первой стенки», но и для решения целого ряда задач в области нанотехнологий.

Послойный химический и фазовый анализ многокомпонентных многослойных пленок на основе рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии

Послойный анализ тонких пленок ведется с помощью разрушающих и неразрушающих методов, кото-

рые подробно описаны в [47]. Если изучают слои вещества толщиной более 10 нм, то применяют ионное распыление в комбинации с каким-нибудь неразрушающим методом анализа поверхности. Взаимодействие ионов с поверхностью приводит не только к распылению, но и за счет селективного распыления и ионного перемешивания к изменению оставшихся слоев твердого тела на глубину проективного пробега ионов.

Приповерхностная область бывает не только многослойной, но и слоисто-многокомпонентной и многофазной. Послойный анализ на основе интерпретации фотоэлектронных спектров — достаточно сложная обратная задача со многими заранее неизвестными параметрами. На кафедре ОФиЯС предложен новый подход [48, 49] к количественному и неразрушающему определению послойного химического и фазового составов многокомпонентных многослойных пленок на основе РФЭС. Он состоит из метода вычитания фона многократно неупругорассеянных фотоэлектронов, учитывающего неоднородность неупругого рассеяния по глубине; способа разложения фотоэлектронной линии на составляющие пики, учитывающего физическую природу различных параметров разложения; решения задачи вычитания фона и разложения фотоэлектронной линии совместно; определения толщин слоев многослойной мишени по простой формуле. Для контроля разложения фотоэлектронных линий и выбора из альтернативных решений оптимального предложено использовать критерий качества разложения: расчет средних относительных стехиометрических коэффициентов соединения элементов мишени по интенсивностям различных линий и вычисление этих же коэффициентов по парциальным интенсивностям пиков линии и химическому сдвигу должны давать один и тот же результат.

На основе представленного метода были получены послойные химические и фазовые составы наноразмерных пленок Nb и NbN на кремниевой подложке [49]. Интерес к пленкам ниобия и его соединений вызван их сверхпроводящими свойствами, применяемыми в приборах криогенной электроники. Так, НЕВ смеситель (hot electron bolometer mixer, или смеситель на эффекте электронного разогрева в сверхпроводящих пленках), изготовленный на основе наноразмерной пленки NbN, является одним из наиболее перспективных приемников терагерцового излучения [50].

Лаборатория физики плазмы

В 2005 г. на кафедре ОФиЯС организована лаборатория физики плазмы как база для проведения научно-исследовательских работ и подготовки бакалавров и магистров. Сотрудниками лаборатории подготовлен ряд уникальных плазменных установок и измерительных приборов. С их помощью можно проводить как научно-исследовательские, так и лабораторные работы

по измерениям и определениям основных параметров плазмы. В наличии имеются: ВЧИ-плазмотрон малой мощности для химического спектрального анализа, дуговой плазмотрон для изучения процессов свободного горения плазмы, высоковольтная установка для исследования стримерного и дугового разряда с электролизом, установка холодной плазмы для изучения воздействия разряда на биологические ткани. Экспериментальные стенды оснащены необходимым оборудованием для измерения и анализа химических реагентов в плазме. Разработан метод структурного моделирования плазмы и плазменных процессов, имитирующий картину тепломассообмена в плазме и позволяющий выявлять связи между внутренними и внешними параметрами плазмотронов; определять оптимальный режим их согласования с источниками питания; решать задачи анализа и синтеза плазменных технологических установок.

Сотрудниками лаборатории физики плазмы опубликовано более 60 научных трудов, 2 монографии, 5 учебных пособий. В 2017 г. подготовлена и издана на английском языке новая монография по физике низкотемпературной плазмы.

Заключение

Технические решения, в которых реализованы передовые физические идеи, всегда находились на пределе современных технологических возможностей. Сооружение международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР потребовало разработки специальных систем питания, управления и защиты. Нужны были беспрецедентные по своим возможностям системы вакуумного обеспечения, создавались средства быстрой многоканальной регистрации, решалась проблема интенсификации теплообмена. Все это стимулировало развитие соответствующих производств, появление той культуры, которую теперь принято называть высокими технологиями.

На базе работ, направленных на решение задачи термоядерного синтеза, возникли различные «побочные» приложения: плазменные, вакуумные, пучковые технологии. Без них не было бы элементной базы современной информационной техники. Плазменная и пучковая обработка поверхностей материалов придала им новые качества, недостижимые ранее.

Литература

1. **Dedov A.V., Komov A.T., Varava A.N., Yagov V.V.** Hydrodynamics and Heat Transfer in Swirl Flow Under Conditions of One-Side Heating. Pt. 2. Boiling Heat Transfer. Critical Heat Fluxes // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2010. No. 53 (21—22). Pp. 4966—4975.
2. **Болтенко Э.А. и др.** Исследование теплоотдачи и гидравлического сопротивления в кольцевом канале с интенсификаторами теплообмена // Теплоэнергетика. 2015. № 3. С. 22—28.
3. **Smorchkova Y.V., Varava A.N., Dedov A.V., Komov A.T.** Experimental Study of Fluid Dynamics in the Pebble Bed in a Radial Coolant Flow // J. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 754. Pp. 1—5.
4. **Будаев В.П.** Результаты испытаний вольфрамовых мишеней дивертора при мощных плазменно-тепловых нагрузках, ожидаемых в ИТЭР и токамаках реакторного масштаба (обзор) // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Термоядерный синтез». 2015. № 38 (4). С. 5—33.
5. **Budaev V.P. et al.** Tungsten Recrystallization and Cracking under Iiter-relevant Heat Loads // J. Nucl. Mater. 2015. Vol. 463. Pp. 237—240.
6. **Будаев В.П. и др.** Дальние корреляции в структуре фрактальных пленок // Письма в ЖЭТФ. 2012. № 95 (2). С. 84—90.
7. **Будаев В.П. и др.** Рекристаллизация и изменение рельефа поверхности стали под воздействием излучения в плазменных разрядах большой мощности // Физика плазмы. 2013. Т. 39. № 11. С. 1017—1031.
8. **Будаев В.П.** Стохастическая кластеризация поверхности при взаимодействии плазмы с материалами // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 105. Вып. 5. С. 284—290.
9. **Бочаров Г.С. и др.** Оптимизация упрочнения стальной поверхности углеродными наноструктурами с последующей обработкой высокоинтенсивными источниками // Поверхность. 2017. № 12.
10. **Hummers W.S., Offeman R.E.** Preparation of Graphitic Oxide // J. Am. Chem. Soc. 1958. V. 80. P. 1339.
11. **Li D. et al.** Processable Aqueous Dispersions of Graphene Nanosheets // Nat. Nanotech. 2008. V. 3. P. 101.
12. **Pei S.F., Cheng H.M.** The Reduction of Graphene Oxide // Carbon. 2011. V. 50. Pp. 3210—3228.
13. **Бочаров Г.С. и др.** Термическое восстановление оксида графена // Наноструктуры в конденсированных средах. Минск: Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова, 2016. С. 308—314.
14. **Eletskii A.V., Bocharov G.S.** Physical and Chemical Characteristics of Partially Reduced Graphene Oxide // Proc. Graphene-2017. Barcelona (Spain), 2017. Pp. 28—31.
15. **Кукушкин В.И., Ваньков А.В., Кукушкин И.В.** К вопросу о дальнодействии поверхностно-усиленного рамановского рассеяния // Письма ЖЭТФ. 2013. Т. 98. № 2. С. 72—77.
16. **Елецкий А.В.** Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // УФН. 2002. № 172. С. 401—438.
17. **Eletskii A.V., Bocharov G.S.** Emission Properties of Carbon Nanotubes and Cathodes on Their Basis // Plasma Sources Sci. and Tech. 2009. V. 18. P. 034013.
18. **Елецкий А.В.** Холодные полевые эмиттеры на основе углеродных нанотрубок // УФН. 2010. Т. 180. № 9. С. 897—930.
19. **Bocharov G.S., Eletskii A.V.** Theory of CNT-based Electron Field Emitters // Nanomaterials. 2013. V. 3. Pp. 393—442.

20. **Bocharov G.S., Belsky M.D., Eletskii A.V., Sommerer T.** Electrical Field Enhancement in Carbon Nanotube-Based Electron Field Cathodes // *Fullerenes, Nanotubes, and Carbon Nanostructures*. 2010. V. 19. Pp. 92—99.
21. **Blackie, E.J., Le Ru E.C., Etchegoin, P.G.** Single-Molecule Surface-Enhanced Raman Spectroscopy of Nonresonant Molecules // *J. Am. Chem. Soc.* 2009. V. 131 (40). P. 14466.
22. **Le Ru E.C., Blackie E., Meyer M., Etchegoin P.G.** Surface Enhanced Raman Scattering Enhancement Factors: A Comprehensive Study // *J. Phys. Chem. C*. 2007. V. 111 (37). P. 13794.
23. **Nie S., Emory S.R.** Probing Single Molecules and Single Nanoparticles by Surface-Enhanced Raman Scattering // *Sci.* 1997. V. 275 (5303). P. 1102.
24. **Le Ru E.C., Meyer M., Etchegoin P.G.** Proof of Single-Molecule Sensitivity in Surface Enhanced Raman Scattering (SERS) by Means of a Two-Analyte Technique // *J. Phys. Chem. B*. 2006. V. 110 (4). P. 1944.
25. **Kostanovskiy I.A., Afanas'ev V.P., Naujoks D., Mayer M.** Hydrocarbon Isotope Detection By Elastic Peak Electron Spectroscopy // *J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena*. 2015. V. 202. Pp. 22—25.
26. **Afanas'ev V.P. e. a.** Determination of Atomic Hydrogen in Hydrocarbons by Means of the Reflected Electron Energy Loss Spectroscopy and the X-Ray Photoelectron Spectroscopy // *J. Phys.: Conf. Series*. 2016. V. 748. P. 012005.
27. **CasaXPS.** Proc. Software for XPS, AES, SIMS and More [Официальный сайт] <http://www.casaxps.com> (дата обращения 03.06.2017)
28. **Briggs D., Grant J.T.** *Surface Analysis by Auger and X-Ray Photoelectron Spectroscopy*. Chichester: IM Publ., 2003.
29. **Tilinin I.S., Jablonski A., Zemek J., Hucek S.** Escape Probability of Signal Photoelectrons from Non-crystalline Solids: Influence of Anisotropy of Photoemission // *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* 1997. V. 87. P. 127. Pp. 127—140.
30. **Jablonski A., Zemek J.** // *J Phys. Rev. B*. 1993. V. 48. P. 4799.
31. **Афанасьев В.П., Капля П.С., Головина О.Ю., Грязев А.С.** Расшифровка спектров РФЭС с последовательным учетом влияния процессов многократного упругого и неупругого рассеяния // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2015. № 1. С. 68—73.
32. **Afanas'ev V., Gryazev A.** Angular Distribution of XPS Peaks by Layers of a Finite Thickness // *Advanced Materials Research*. 2015. V. 1085. P. 496—501.
33. **Afanas'ev e. a.** Photoelectron Spectra of Finite-Thickness Layers // *J. Vacuum Sci.&Tech. B*. 2015. V. 33. P. 03D101.
34. **Afanas'ev V.P., Kaplya P.S., Gryazev A.S.** Angle-Resolved Photoelectron Spectra of Layers of Finite Thickness // *J. Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Tech.* 2015. V. 9. P. 590—598.
35. **Афанасьев В.П. и др.** Расчет рентгеновских спектров фотоэлектронов в широком интервале потерь энергии // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2015. № 9. С. 9—14.
36. **Афанасьев В.П., Грязев А.С., Кузнецова А.В., Ляпунов Н.В.** Восстановление дифференциальных сечений неупругого рассеяния электронов из РФЭС и ХПЭ спектров бериллия и углерода // *Ядерная физика и инжиниринг*. 2015. № 9—10. С. 498—503.
37. **Афанасьев В.П. и др.** Спектры характеристических потерь энергии ниобия, дифференциальные сечения неупругих потерь энергии и рентгеновские фотоэлектронные спектры с угловым разрешением // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2016. № 1. С. 73—79.
38. **Afanas'ev V.P., Gryazev A.S., Kaplya P.S., Andreyeva Yu.O.**, Intrinsic Excitation Effect for the Al and Mg Samples XPS Analysis // *J. Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2016. V. 10 (1). Pp. 108—112.
39. **Афанасьев В.П., Капля П.С., Лисицына Е.Д.** Малоугловое приближение и модель Освальда—Каспера—Гауклера в задачах отражения электронов от твердых тел // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2016. № 3. С. 66—71.
40. **Afanas'ev V.P., Efremenko D.S., Kaplya P.S.** Analytical and Numerical Methods for Computing Electron Partial Intensities in the Case of Multilayer Systems // *J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena*. 2016. V. 210. Pp. 16—29.
41. **Афанасьев В.П. и др.** Восстановление дифференциальных сечений неупругого рассеяния на основе спектров рентгеновской фотоэлектронной эмиссии // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2016. № 9. С. 27—32.
42. **Kaplya P.S., Afanas'ev V.P.** Correction Coefficients in X-ray Photoelectron Spectroscopy // *J. Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Tech.* 2016. V. 10 (5). Pp. 1053—1059.
43. **Afanas'ev V.P. e. a.** Kilovolt Electron Backscattering // *Z. Phys. B. Cond. Mat.* 1994. V. 96. Pp. 253—259.
44. **Werner W.S.M.** // *Surf. Interface Anal.* 1995. V. 23. P. 737.
45. **Hofmann S.** *Auger and X-ray Photoelectron Spectroscopy in Material Science*. Berlin: Springer-Verlag, 2013.
46. **Капля П.С.** Создание высокоточных методов анализа твердых тел на основе расшифровки данных электронной спектроскопии методами инвариантного погружения: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2016.
47. **Galindo R.E. e. a.** Towards Nanometric Resolution in Multilayer Depth Profiling: a Comparative Study of RBS, SIMS, XPS and GDOES // *Analytical and Bioanalytical Chem.* 2010. V. 396. No. 8. Pp. 2725—2740.

48. **Lubchenko A.V. e. a.** An XPS Method for Layer Profiling of NbN Thin Films // EPJ Web of Conf. 2017. V. 132. P. 03053.

49. **Лубенченко А.В. и др.** Исследование наноразмерных пленок ниобия и нитрида ниобия методом РФЭС // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тезисы XXII Междунар. науч.-техн. конф. М.: Изд-во МЭИ, 2016. С. 41.

50. **Meledin D. e. a.** A 1.3-THz Balanced Waveguide HEB Mixer for the APEX Telescope // IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. 2009. V. 57 (1). P. 89.

References

1. **Dedov A.V., Komov A.T., Varava A.N., Yagov V.V.** Hydrodynamics and Heat Transfer in Swirl Flow Under Conditions of One-Side Heating. Pt. 2. Boiling Heat Transfer. Critical Heat Fluxes. Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2010;53 (21—22):4966—4975.

2. **Boltenko E.A. i dr.** Issledovanie Teplootdachi i Gidravlicheskogo Soprotivleniya v Kol'tsevom Kanale s Intensifikatorami Teploobmena. Teploenergetika. 2015;3:22—28. (in Russian).

3. **Smorchkova Y.V., Varava A.N., Dedov A.V., Komov A.T.** Experimental Study of Fluid Dynamics in the Pebble Bed in a Radial Coolant Flow. J. Phys. Conf. Ser. 2016:754:1—5.

4. **Budaev V.P.** Rezul'taty Ispytaniy Vol'framovykh Misheney Divertora pri Moshchnykh Plazmenno-teplovnykh Nagruzkah, Ozhidaemykh v ITER i Tokamakakh Reaktornogo Masshtaba (Obzor). Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki. Seriya «Termoyadernyy Sintez». 2015;38 (4):5—33. (in Russian).

5. **Budaev V.P. e. a.** Tungsten Recrystallization and Cracking under Iter-relevant Heat Loads. J. Nucl. Mater. 2015. Vol. 463:237—240.

6. **Budaev V.P. i dr.** Dal'nie Korrelyatsii v Strukture Fraktal'nykh Plenok. Pis'ma v ZHETF. 2012;95 (2):84—90. (in Russian).

7. **Budaev V.P. i dr.** Rekrystallizatsiya i Izmenenie Rel'efa Poverhnosti Stali pod Vozdeystviem Izlucheniya v Plazmennykh Razryadah Bol'shoy Moshchnosti. Fizika Plazmy. 2013;39;11:1017—1031. (in Russian).

8. **Budaev V.P.** Stokhasticheskaya Klasterizatsiya Poverhnosti pri Vzaimodeystvii Plazmy s Materialami. Pis'ma v ZHETF. 2017;105;5:284—290. (in Russian).

9. **Bocharov G.S. i dr.** Optimizatsiya Uprochneniya Stal'noy Poverhnosti Uglerodnymi Nanostrukturami s Posleduyushchey Obrabotkoy Vysokointensivnymi istochnikami. Poverhnost'. 2017;12. (in Russian).

10. **Hummers W.S., Offeman R.E.** Preparation of Graphitic Oxide. J. Am. Chem. Soc. 1958;80:1339.

11. **Li D. e. a.** Processable Aqueous Dispersions of Graphene Nanosheets. Nat. Nanotech. 2008;3:101.

12. **Pei S.F., Cheng H.M.** The Reduction of Graphene Oxide. Carbon. 2011;50:3210—3228.

13. **Bocharov G.S. i dr.** Termicheskoe Vosstanovlenie Oksida Grafena. Nanostruktury v Kondensirovannykh Sredah. Minsk: Institut Teplo- i Massoobmena im. A.V. Lykova. 2016:308—314. (in Russian).

14. **Eletskii A.V., Bocharov G.S.** Physical and Chemical Characteristics of Partially Reduced Graphene Oxide. Proc. Graphene-2017. Barcelona (Spain), 2017:28—31.

15. **Kukushkin V.I., Van'kov A.V., Kukushkin I.V.** K Voprosu o Dal'nodeystvii Poverhnostno-usilennogo Ramanovskogo Rasseyaniya. Pis'ma ZHETF. 2013;98;2:72—77. (in Russian).

16. **Eletskiy A.V.** Uglerodnye Nanotrubki i ih Emissionnye Svoystva. UFN. 2002;172:401—438. (in Russian).

17. **Eletskii A.V., Bocharov G.S.** Emission Properties of Carbon Nanotubes and Cathodes on Their Basis. Plasma Sources Sci. and Tech. 2009;18:034013.

18. **Eletskiy A.V.** Holodnye Polevyje Emittery na Osnove Uglerodnykh Nanotrubok. UFN. 2010;180;9:897—930. (in Russian).

19. **Bocharov G.S., Eletskii A.V.** Theory of CNT-based Electron Field Emitters. Nanomaterials. 2013;3:393—442.

20. **Bocharov G.S., Belsky M.D., Eletskii A.V., Sommerer T.** Electrical Field Enhancement in Carbon Nanotube-Based Electron Field Cathodes. Fullerenes, Nanotubes, and Carbon Nanostructures. 2010;19:92—99.

21. **Blackie, E.J., Le Ru E.C., Etchegoin, P.G.** Single-Molecule Surface-Enhanced Raman Spectroscopy of Nonresonant Molecules. J. Am. Chem. Soc. 2009;131 (40):14466.

22. **Le Ru E.C., Blackie E., Meyer M., Etchegoin P.G.** Surface Enhanced Raman Scattering Enhancement Factors: A Comprehensive Study. J. Phys. Chem. C. 2007; 111 (37):13794.

23. **Nie S., Emory S.R.** Probing Single Molecules and Single Nanoparticles by Surface-Enhanced Raman Scattering. Sci. 1997; 275 (5303):1102.

24. **Le Ru E.C., Meyer M., Etchegoin P.G.** Proof of Single-Molecule Sensitivity in Surface Enhanced Raman Scattering (SERS) by Means of a Two-Analyte Technique. J. Phys. Chem. B. 2006;110 (4):1944.

25. **Kostanovskiy I.A., Afanas'ev V.P., Naujoks D., Mayer M.,** Hydrocarbon Isotope Detection By Elastic Peak Electron Spectroscopy. J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena. 2015;202:22—25.

26. **Afnas'ev V.P. e. a.** Determination of Atomic Hydrogen in Hydrocarbons by Means of the Reflected Electron Energy Loss Spectroscopy and the X-Ray Photoelectron Spectroscopy. J. Phys.: Conf. Series. 2016; 748:012005.

27. **CasaXPS.** Proc. Software for XPS, AES, SIMS and More [Ofits. Sayt] <http://www.casaxps.com> (Data Obrashcheniya 03.06.2017)

28. **Briggs D., Grant J.T.** Surface Analysis by Auger and X-Ray Photoelectron Spectroscopy. Chichester: IM Publ., 2003.

29. **Tilinin I.S., Jablonski A., Zemek J., Hucek S.** Escape Probability of Signal Photoelectrons from Non-crystalline Solids: Influence of Anisotropy of Photoemission. *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* 1997;87;127:127—140.
30. **Jablonski A., Zemek J.** *J Phys. Rev. B.* 1993;48:4799.
31. **Afnas'ev V.P., Kaplya P.S., Golovina O.Yu., Gryazev A.S.** Rasshifrovka Spektrov RFES s Posledovatel'nym Uchetom Vliyaniya Protsevv Mnogokratnogo Uprugogo i Neuprugogo Rasseyaniya. Poverhnost'. Rentgenovskie, Sinhrotronnye i Neytronnye Issledovaniya. 2015;1:68—73. (in Russian).
32. **Afnas'ev V., Gryazev A.** Angular Distribution of XPS Peaks by Layers of a Finite Thickness. *Advanced Materials Research.* 2015;1085:496—501.
33. **Afnas'ev e. a.** Photoelectron Spectra of Finite-Thickness Layers. *J. Vacuum Sci.&Tech. B.* 2015;33: 03D101.
34. **Afnas'ev V.P., Kaplya P.S., Gryazev A.S.** Angle-Resolved Photoelectron Spectra of Layers of Finite Thickness. *J. Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Tech.* 2015;9:590—598.
35. **Afnas'ev V.P. i dr.** Raschet Rentgenovskih Spektrov Fotoelektronov v Shirokom Intervale Poter' Energii. Poverhnost'. Rentgenovskie, Sinhrotronnye i Neytronnye Issledovaniya. 2015;9:9—14. (in Russian).
36. **Afnas'ev V.P., Gryazev A.S., Kuznetsova A.V., Lyapunov N.V.** Vosstanovlenie Differentsial'nyh Secheniy Neuprugogo Rasseyaniya Elektronov iz RFES i HPE Spektrov Berilliya i Ugleroda. Yadernaya Fizika i Inzhiniring. 2015;9—10:498—503. (in Russian).
37. **Afnas'ev V.P. i dr.** Spektry Harakteristicheskikh Poter' Energii Niobiya, Differentsial'nye Secheniya Neuprugih Poter' Energii i Rentgenovskie Fotoelektronnye Spektry s Uglovym Razresheniem. Poverhnost'. Rentgenovskie, Sinhrotronnye I Neytronnye Issledovaniya;2016;1:73—79. (in Russian).
38. **Afnas'ev V.P., Gryazev A.S., Kaplya P.S., Andreyeva Yu.O.** Intrinsic Excitation Effect for the Al and Mg Samples XPS Analysis. *J. Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques.* 2016;10 (1): 108—112.
39. **Afnas'ev V.P., Kaplya P.S., Lisitsyna E.D.** Malouglovoe Priblizhenie i Model' Osval'da–Kaspera–Gauklera v Zadachah Otrazheniya Elektronov ot Tverdyh Tel. Poverhnost'. Rentgenovskie, Sinhrotronnye I Neytronnye Issledovaniya. 2016;3:66—71. (in Russian).
40. **Afnas'ev V.P., Efremenko D.S., Kaplya P.S.** Analytical and Numerical Methods for Computing Electron Partial Intensities in the Case of Multilayer Systems. *J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena.* 2016;210:16—29.
41. **Afnas'ev V.P. i dr.** Vosstanovlenie Differentsial'nyh Secheniy Neuprugogo Rasseyaniya na Osnove Spektrov Rentgenovskoy Fotoelektronnoy Emissii. Poverhnost'. Rentgenovskie, Sinhrotronnye i Neytronnye Issledovaniya. 2016;9:27—32. (in Russian).
42. **Kaplya P.S., Afnas'ev V.P.** Correction Coefficients in X-ray Photoelectron Spectroscopy. *J. Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Tech.* 2016;10 (5):1053—1059.
43. **Afnas'ev V.P. e. a.** Kilovolt Electron Backscattering. *Z. Phys. B. Cond. Mat.* 1994;96:253—259.
44. **Werner W.S.M.** *Surf. Interface Anal.* 1995;23: 737.
45. **Hofmann S.** Auger and X-ray Photoelectron spectroscopy in material Science. Berlin: Springer-Verlag, 2013.
46. **Kaplya P.S.** Sozdanie Vysokotochnyh Metodov Analiza Tverdyh Tel na Osnove Rasshifrovki Danykh Elektronnoy Spektroskopii Metodami Invariantnogo Pogruzheniya: Diss. ... Kand. Fiz.-mat. Nauk. M., 2016. (in Russian).
47. **Galindo R.E. e. a.** Towards Nanometric Resolution in Multilayer Depth Profiling: a Comparative Study of RBS, SIMS, XPS and GDOES. *Analytical and Bioanalytical Chem.* 2010;396;8:2725—2740.
48. **Lubenchenko A.V. e. a.** An XPS Method for Layer Profiling of NbN Thin Films. *EPJ Web of Conf.* 2017;132: 03053.
49. **Lubenchenko A.V. i dr.** Issledovanie Nanorazmernykh Plenok Niobiya i Nitrida Niobiya Metodom RFES. Radioelektronika, Elektrotehnika i Energetika: Tezisy XXII Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Konf. M.: Izd-vo MPEI, 2016:41. (in Russian).
50. **Meledin D. e. a.** A 1.3-THz Balanced Waveguide HEB Mixer for the APEX Telescope. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.* 2009;57 (1):89.

Сведения об авторах

Афанасьев Виктор Петрович — доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики и ядерного синтеза НИУ «МЭИ», e-mail: afanasyevvip@gmail.com

Будаев Вячеслав Петрович — доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики и ядерного синтеза НИУ «МЭИ», e-mail: budaev@mail.ru

Дедов Алексей Викторович — доктор технических наук, чл.-корр. РАН, заведующий кафедрой общей физики и ядерного синтеза, директор института тепловой и атомной энергетики НИУ «МЭИ», e-mail: DedovAV@mpei.ru

Елецкий Александр Валентинович — доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики и ядерного синтеза НИУ «МЭИ», e-mail: YeletskyAV@mpei.ru

Комов Александр Тимофеевич — доктор технических наук, профессор кафедры общей физики и ядерного синтеза, советник при ректорате НИУ «МЭИ», e-mail: KomovAT@mpei.ru

Кулыгин Владимир Михайлович — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики и ядерного синтеза НИУ «МЭИ», e-mail: KulyginVM@mpei.ru

Лубенченко Александр Владимирович — доктор технических наук, профессор кафедры общей физики и ядерного синтеза НИУ «МЭИ», e-mail: LubenchenkoAV@mpei.ru

Федорович Сергей Дмитриевич — кандидат технических наук, доцент кафедры общей физики и ядерного синтеза НИУ «МЭИ», e-mail: fedorovichsd@mail.ru

Ши Нгуен-Куок — доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики и ядерного синтеза НИУ «МЭИ», e-mail: NguyenKS@mpei.ru

Information about authors

Afanas'ev Viktor P. — Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor of General Physics and Nuclear Fusion Dept., NRU MPEI, e-mail: afanasyevvip@gmail.com

Budaev Vyacheslav P. — Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor of General Physics and Nuclear Fusion Dept., NRU MPEI, e-mail: budaev@mail.ru

Dedov Aleksey V. — Dr.Sci. (Techn.), Corresponding Member of RAS, Head of General Physics and Nuclear Fusion

Dept., Director of Thermal and Nuclear Power Engineering Institute, NRU MPEI, e-mail: DedovAV@mpei.ru

Eletskii Aleksandr V. — Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor of General Physics and Nuclear Fusion Dept., NRU MPEI, e-mail: YeletskyAV@mpei.ru

Komov Aleksandr T. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of General Physics and Nuclear Fusion Dept., Rector Advisor, NRU MPEI, e-mail: KomovAT@mpei.ru

Kulygin Vladimir M. — Ph.D. (Phys.-Math.), Assistant Professor of General Physics and Nuclear Fusion Dept., NRU MPEI, e-mail: KulyginVM@mpei.ru

Lubenchenko Aleksandr V. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of General Physics and Nuclear Fusion Dept., NRU MPEI, e-mail: LubenchenkoAV@mpei.ru

Fedorovich Sergey D. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of General Physics and Nuclear Fusion Dept., NRU MPEI, e-mail: fedorovichsd@mail.ru

Shi Nguyen-Kuok — Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor of General Physics and Nuclear Fusion Dept., NRU MPEI, e-mail: NguyenKS@mpei.ru

Статья поступила в редакцию 29.05.2017