

Федеральное агентство научных организаций  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ  
ИМ. С.А. ХРИСТИАНОВИЧА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИТПМ СО РАН)

УДК 54.03:621.793  
№ гос. рег. 01201351871  
Инв. № 13/17



УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИТПМ СО РАН  
чл.-корр. РАН

А.Н. Шиплюк  
2016 г.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ЧИСЛЕННЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРНО-  
ВОЛНОВЫХ НАГРУЖЕНИЙ ГЕТЕРОГЕННЫХ И КОМПОЗИТНЫХ СРЕД И  
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ГРАНИЦАХ  
(заключительный)

Номер проекта в ИСГЗ ФАНО 0323-2014-0012

Приоритетное направление III.23. Механика деформирования и разрушения  
материалов, сред, изделий, конструкций, сооружений и триботехнических систем  
при механических нагрузках, воздействии физических полей и химически активных  
сред

Программа ФНИ СО РАН III.23.4. Механика гетерогенных, композитных сред и  
технологии на их основе

Протокол Ученого совета ИТПМ СО РАН  
№ 12 от 01.12.2016

Руководитель проекта  
академик

В.М. Фомин

Новосибирск 2016

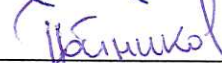
## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель проекта

Научный руководитель института Фомин В.М.

 12.01.17.

Старший научный сотрудник Постников Б.В.

 12.01.17

Младший научный сотрудник Ломанович К.А.

 12.01.17

Главный научный сотрудник Бардаханов С.П.

 12.01.17

Старший научный сотрудник Сызранцев В.В.

 12.01.17

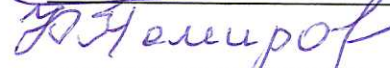
Научный сотрудник Труфанов Д.Ю.

 12.01.17

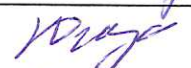
Младший научный сотрудник Завьялов А.П.

 12.01.2017.

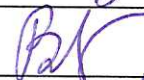
Младший научный сотрудник Зобов К.В.

 12.01.17

Младший научный сотрудник Юсуф А.А.

 12.01.17.

Ведущий научный сотрудник Лысенко В.И.

 12.01.17

Старший научный сотрудник Поздняков Г.А.

 12.01.17

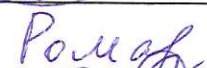
Ведущий научный сотрудник Кацнельсон С.С.

 12.01.17


Главный научный сотрудник Немировский Ю.В.

 12.01.17

Старший научный сотрудник Романова Т.П.

 12.01.17

Ведущий научный сотрудник Янковский А.П.

 12.01.17

## РЕФЕРАТ

**Объем отчета:** 32 стр., 9 рис.

**Дата начала и окончания НИР:** 2013 - 2016 гг.

**Ключевые слова и словосочетания:** сверхзвуковые потоки, катализаторы периодической структуры, наноразмерные порошки, метод электроискрового спекания, дисковый ускоритель плазмы, установка адиабатического сжатия, нагрузки взрывного типа.

### **Цели проекта на 2016 год:**

Разработка экспериментального стенда для исследования взаимодействия высокоэнтальпийной сверхзвуковой струи углеводородов с газопроницаемыми преградами из углетканного катализатора. Численное моделирование натекания сверхзвуковой струи углеводородов на сетчатые структуры носителей катализатора в двумерной невязкой постановке.

Создание янус-подобных наноразмерных частиц из диоксида кремния, оксида алюминия и других веществ. Испытание их воздействия на прочность полимерных композитов.

Создание плотной керамики из нанопорошков оксида ниобия и оксида магния на установке горячего прессования "Sinter Land" и исследование свойств полученной керамики (в частности, определение её микротвердости).

На основе реактора адиабатического сжатия создание импульсного источника сверхзвукового двухфазного потока, содержащего наночастицы различного химического состава (кремний, углерод, карбид кремния). Исследование кинетических механизмов процессов, протекающих в форкамере адиабатического сжатия и выполнение работ по оптимизации соответствующих кинетических схем.

Исследование оптимальных структур армирования тонкостенных трехслойных цилиндрических оболочек при гармонических и ангармонических динамических нагружениях.

Исследование предельного состояния и динамического поведения полигональных и криволинейных армированных пластических плит при воздействии взрывных нагрузок.

Разработка численно-аналитической модели и исследование особенностей неупругого динамического поведения армированных гибких искривленных панелей в рамках неклассической теории, учитывающей их ослабленное сопротивление поперечному сдвигу.

### **Краткая характеристика полученных результатов**

Поставленные планы выполнены полностью. Из важнейших результатов следует отметить следующие:

Проведены эксперименты, направленные на исследование взаимодействия высокоэнтальпийной сверхзвуковой струи углеводородов с содержанием ацетилена 5–7 % мас. с пористой преградой из углетканного катализатора. Результаты хроматографического анализа показали наличие в конечном продукте бензола в количестве 0,01–0,1 % масс.

Созданы янус-подобные наноразмерные частицы из диоксида кремния, оксида алюминия и других веществ. Испытано их воздействие на прочность полимерных композитов.

Проведено изучение зависимости структуры наночастиц, получаемых в поршневом реакторе при пиролизе ацетилена, добавленного в гелий, от ускоряющего поршень давления газа, задающего скорость движения поршня и конечную степень сжатия.

Разработана уточненная теория термоупругопластического изгиба армированных пластин, в рамках которой деформации поперечных сдвигов раскладываются в ряды по нормальной координате.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	5
2. Основная часть	
2.1. Численные и экспериментальные исследования особенностей взаимодействия носителей катализатора с высокоэнтальпийными потоками в условиях ударно-волнового газодинамического нагружения	5
2.1.1 Экспериментальная установка	5
2.1.2. Численное моделирование	6
2.2. Получение наноразмерных порошков	7
2.2.1. Исследование процессов влияющих на формирование наночастиц при получении нанопорошков методом испарения электронным пучком	7
2.2.2. Анализ поведения наночастиц в сложной двухкомпонентной смеси ПДЖК, измерение электрооптических свойств ПДЖК, разработка модели процесса модификации их наночастицами	11
2.3. Методы создания и исследования свойств керамических материалов из наноразмерных порошков	14
2.4. Изучение процессов роста пленок субмикронной толщины по оригинальной методике – в сверхзвуковом потоке плазмы, генерируемой МГД-ускорителем. Создание прототипа установки для производства монодисперсных нанопорошков различных соединений и индивидуальных элементов	16
2.5. Нестационарные задачи механики композитных материалов и конструкций	20
2.5.1. Разработка модели и выполнение математического анализа задач динамического поведения при воздействии ударных и локальных нагрузок на плоские конструкции с произвольным контуром из однородных и композитных материалов	20
2.5.2 Исследование предельного состояния и динамического поведения полигональных и криволинейных армированных пластических плит при воздействии взрывных нагрузок	21
2.5.3 Разработка численно-аналитической модели и исследование особенностей неупругого динамического поведения армированных гибких искривленных панелей в рамках неклассической теории, учитывающей их ослабленное сопротивление поперечному сдвигу	23
3. Заключение	25
4. Публикации	27
4.1. Основные	27
4.2. Труды конференций и тезисы докладов	29
Приложение 1	32

## 1. Введение

Целью проекта является получение новых научных знаний по ударно-волновым нагрузениям гетерогенных и композитных сред и физико-химическим взаимодействиям на границах. Актуальность данной проблемы полностью соответствует списку приоритетных направлений науки и техники Российской Федерации.

Настоящий отчет является заключительным по теме: "Численные и экспериментальные исследования ударно-волновых нагрузений гетерогенных и композитных сред и физико-химические взаимодействия на границах", по которой были представлены отчеты по этапам 2013, 2014, 2015 годов.

## 2. Основная часть

### 2.1. Численные и экспериментальные исследования особенностей взаимодействия носителей катализатора с высокоэнтальпийными потоками в условиях ударно-волнового газодинамического нагружения

#### 2.1.1. Экспериментальная установка

Для проведения экспериментов по исследованию взаимодействия ацетиленсодержащего потока углеводородов с газопроницаемой преградой, выполненной путем группирования углеродных волокон на сетчатой основе подготовлена струйная установка. Метан из баллона высокого давления поступает через редуктор и калиброванный ротаметр в плазматрон с вихревой стабилизацией дуги. В вихревой камере плазматрона происходит пиролиз метана и на выходе из звукового сопла плазматрона рабочий газ, состоящий из композиции газов пиролиза с содержанием ацетилена в пределах 5-7%об (60–80 об.% CH<sub>4</sub>, 10–20 об.% H<sub>2</sub>, 5–7 об.% C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), попадает в камеру Эйфеля, где напротив сопла плазматрона диаметром 2 мм монтируется преграда с контейнером на основе сетки. Данные о составе газа после термического разложения предполагается обрабатывать на хроматографе.

Преграда представляет собой стакан, наполненный на сетчатом каркасе и заполненный углеродными волокнами углеткани с диаметром волокон 5-15 мкм. Из внутреннего объема преграды с расходом, меньшим расхода рабочего газа, идет забор пробы конечного продукта в газовый хроматограф. Диапазон параметров расхода рабочего газа составляет 8-12 л/мин.

На рис.1 приведены фотографии тестовых экспериментов, зафиксированные посредством скоростной теневой съемки струи рабочего газа, вытекающей из сопла, высокоскоростной камерой Photron FASTCAM SA-Z. Экспозиция фотоснимков составляет 10 мкс. Видно, что вытекающая холодная струя имеет многоблочковую структуру и высокую дальнобойность. Высокоэнтальпийная струя характеризуется высокой турбулентностью.

В дальнейших экспериментах предполагается исследовать влияние расхода рабочего газа, давления, газодинамической структуры высокоскоростной струи рабочего газа, содержания ацетилена, характеристик и свойств углеткани, формы сетчатого каркаса на выход конечного полезного продукта.

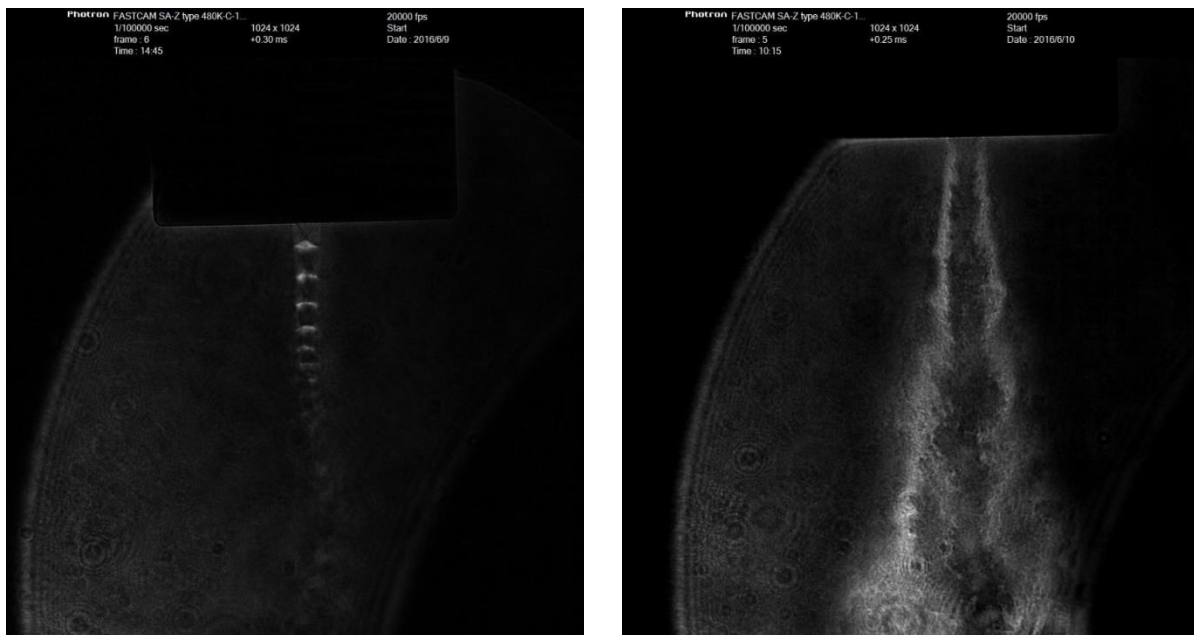


Рис.1 а) свободная холодная струя, б) высокоэнтальпийная струя

### 2.1.2. Численное моделирование

Численное моделирование процесса натекания сверхзвуковой струи рабочего газа моделировалось в программном пакете Ansys Fluent натеканием метана на структура углеводородных волокон диаметром 15 мкм. Задача решалась в стационарном двумерном невязком приближении идеального газа. Нити «закреплялись» одним слоем неподвижно в натекающем сверхзвуковом потоке. Расстояние между нитями соответствовало их диаметру. Расчеты были проведены для числа Маха 1,5 при давлениях газа в потоке  $P$  от 1 до 10 ат и температуре  $T = 300\text{K}$  и  $1000\text{K}$ . Область расчета была разделена на 800 тыс. расчетных ячеек, строилась структурированная сетка с увеличением плотности вблизи поверхности нитей и предполагаемой области расположения головной ударной волны и турбулентного следа. Проводилась адаптация сетки по градиенту температуры. Результаты расчетов показывают, что нити находятся в области нагрева газа за головной ударной волной, за которой происходит резкое увеличение температуры. Нахождение нитей в области равномерного нагрева должно обеспечить проведение каталитических реакций на их поверхности. За нитями тянутся температурные следы, которые могут способствовать завершению процесса химического преобразования в горячем следе, если времени нахождения реагента вблизи поверхности нити оказалось недостаточно. Актуальным следует считать вопрос о минимально возможном времени нахождения реагента вблизи поверхности катализатора, необходимое время индукции, что ограничивает предельный расход газа через реактор рассматриваемого типа. Кроме того, в предлагаемой схеме увеличение слоев ткани существенно увеличивает гидравлическое сопротивление тракта реактора и следует минимизировать их количество без ущерба в выходе полезного продукта. С точки зрения газодинамики при малой плотности размещения нитей возможны режимы формирования индивидуальных ударных волн вблизи каждой нити.

За период 2013-2016 гг. проведены уникальные эксперименты, впервые исследовано взаимодействие кордиеритовой керамики, представляющей собой периодическую структуру с протяженными каналами со сверхзвуковыми струями. Эксперименты и численное моделирование показали перспективность данного направления исследования, когда после прохождения преднагревателя возможно за счет многократного отражения ударных волн в каналах носителя катализатора производить аномальный нагрев рабочего газа до температур проведения реакций. Данная задача является междисциплинарной, что подчеркивает ее актуальность. Достигнутые в рамках проекта результаты соответствуют поставленным задачам и могут служить основой для

проведения дальнейших НИР и НИОКР. Другое направление, развитие которого начато в рамках проекта связано с комбинацией пиролизического реактора и каталитического, изготовленного на основе тканного материала. Исследование закономерностей взаимодействия сверхзвуковых высокоэнтальпийных струй с податливыми материалами (soft matter) также является актуальной задачей современной прикладной газовой динамики.

## 2.2. Получение наноразмерных порошков

В 2016 году работы неформальной группы «ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА НАНОСИСТЕМ И НАНОМАТЕРИАЛОВ» продолжались в нижеперечисленных направлениях.

1. Получение наноразмерных и микропорошков и применение в перспективных отраслях промышленности.
2. Газофазные методы получения наноразмерных и микропорошков с учетом высокотемпературных реакций.
3. Электрооптические свойства наночастиц в различных средах и функциональные материалы с наночастицами.
4. Физико-химические свойства наночастиц в зависимости от метода синтеза, проявляющиеся во взаимодействии со сплошными средами.
5. Наноразмерные порошки и создание конструкционных и функциональных керамических композиционных материалов.
6. Практическое использование порошков в современных и новейших отраслях промышленности.

В данном Отчете приводятся результаты по направлениям 2 и 3.

### 2.2.1. Исследование процессов влияющих на формирование наночастиц при получении нанопорошков методом испарения электронным пучком

Разработаны теоретические основы расчётного метода оценки равновесной концентрации паров. При испарении газообразная и конденсированная фазы находятся в состоянии термодинамического равновесия, следовательно, выполняется равенство свободных энергий  $\Phi$  конденсированной и парообразной фазы в расчете на один моль вещества. При простом механизме испарения вещества, предполагающем прямой переход вещества в конденсированном состоянии  $Q(\kappa, \mu)$  в точно такое же вещество в газообразном состоянии  $Q(\zeta)$ , легко получить выражение для равновесного давления паров следующего вида:

$$P = P_H \exp\left(\frac{\Phi_{\zeta}(T) - \Phi_{\kappa, \mu}(T)}{R}\right), \quad (1)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная, а  $P_H = 101\,325 \text{ Па} = 1 \text{ атм}$ .

Испарение веществ с разложением, которое имеет место, например, при испарении оксидов, требует рассмотрения множества реакций испарения типа  $Q(\kappa, \mu) \rightarrow \sum x_j A^j(\zeta)$ . При этом полное давление паров является суммой давлений паров, устанавливающихся в отдельных реакциях  $P = \sum P_p$ . Давление в конкретной реакции испарения определяется набором стехиометрических коэффициентов  $x_j$ :

$$P_p = P_0 \sum x_j = P_H \exp \left( \frac{\sum x_i \left( \Phi_z^i(T) + R \ln \frac{\sum x_j}{x_i} \right) - \Phi_{к,ж}(T)}{R \sum x_i} \right) \quad (2)$$

В общем случае число реакций испарения бесконечно даже для ограниченного круга веществ, рассматриваемых в качестве продуктов реакции испарения, информация о которых доступна в справочных изданиях. Разумеется, при вычислениях необходимо ограничиться конечным их числом. Поэтому был разработан алгоритм, позволяющий находить сотни тысяч конкретных наборов стехиометрических коэффициентов реакций испарения, в котором приоритет отдаётся реакциям с участием наименьшего числа молекул в конденсированном состоянии. Приведены качественные и количественные ошибки расчётного метода, не превышающие ~4%.

Даны представления о связи производительности метода получения наночастиц с температурной зависимостью равновесной концентрации паров испаряемого вещества. Скорость охлаждения паров высока и всё испарившееся вещество можно считать конденсирующимся в наночастицы, которые уносятся проходящим потоком газа-носителя. При этом нет оснований полагать процесс испарения материала мишени неравновесным. Поэтому поток вещества с поверхности мишени можно описывать формулой испарения в вакуум. Учитывая «неизотемпературность» поверхности генерации паров, можно показать, что производительность  $dM/dt$  в этом случае определяется некоторой средней характерной температурой поверхности  $T^\circ$  в соответствии с температурной зависимостью равновесной концентрации паров:

$$\frac{dM}{dt} \propto c^\circ(T^\circ) \quad (3)$$

Обозначены причины изменения примесного состава вещества при его испарении и конденсации в наночастицы и методика оценки условий испарения по этим изменениям. Основное вещество с примесями можно рассматривать в качестве раствора, в котором основное вещество выступает в роли растворителя. Малая концентрация растворённого вещества позволяет описывать свойства основного вещества – растворителя, как если бы раствор был идеальным. Поскольку в данной работе использовались высокочистые материалы мишени (>99%), то раствор можно считать предельно разбавленным и обладающим свойствами идеального раствора. В предположении отсутствия химического взаимодействия между растворителем и примесями можно также рассматривать последние, как компоненты идеального раствора. Справедливости ради следует признать, что достаточных оснований для этого предположения нет. В этом случае справедлив закон Рауля: «Равновесное парциальное давление пара компонента в идеальном растворе  $P_i$  пропорционально мольной доле этого компонента  $X_i$ ». Зависимость давления от температуры различна для различных веществ. Используя уравнение состояния идеального газа в виде  $P_i = c_i k_B T$ , из закона Рауля можно получить выражение на соотношение между мольными долями примесного вещества в конденсированном веществе  $X_i$  и его парах  $X_i'$ :

$$\frac{c_i^\circ(T)}{c_j^\circ(T)} = \frac{X_i' / X_i}{X_j' / X_j}, \quad (4)$$

где  $c_i^\circ(T)$  – равновесная концентрация паров над чистым веществом  $i$ .



Используемая методика позволяет измерить примесный элементный состав  $\chi_i$  испаряемого материала мишени и полученного из паров нанопорошка. Связь между мольными долями вещества  $X_k$  и элемента  $\chi_i$  задаётся через стехиометрический индекс  $a_{i,k}$ , с которым данный элемент входит в состав этого вещества  $X_k = \chi_i/a_{i,k}$ . Кроме того выражение (4) подразумевает испарение без разложения. Если предположить, что элементный состав примесей в нанопорошке в точности соответствует элементному составу примесей в парах вещества мишени, а также считать элемент входящим в примеси материала мишени и нанопорошка в составе одного и того же вещества, то можно получить следующее выражение:

$$\frac{c_i^0(T)}{c_j^0(T)} = \frac{a_{i,k}(k, \text{ж})}{a_{j,l}(k, \text{ж})} \frac{\chi_i' / \chi_i}{\chi_j' / \chi_j}, \quad (5)$$

где под  $c_i^0(T)$  уже подразумевается суммарная равновесная концентрация  $i$ -ого элемента в парах над чистым  $k$ -ым веществом, для определения которой требуется знание температурной зависимости компонентного состава паров испаряемого с разложением вещества, которую сложно найти в справочниках, однако можно построить освещаемым выше расчётным методом.

Формула (5) является основой метода оценки условий испарения вещества мишени по данным об элементном примесном составе испаряемого вещества и получающихся нанопорошков и расчётных зависимостей равновесных концентраций элементов в парах над чистыми веществами.

Проведены кинетические оценки скорости охлаждения паров в газе-носителе и вычисление различных параметров процесса формирования наночастиц при конденсации паров, построение модельных представлений.

Полученные из экспериментов оценки условий испарения материала мишени ( $T \approx 2350$  К, а мольная доля паров  $x \approx 0,04$ ) из высокочистого кварцевого песка, показывают, что после испарения частица примерно в 20 раз чаще сталкивается с частицей газа-носителя, чем с другой частицей пара. Ввиду того, что локальное термодинамическое равновесие в газе наступает вследствие всего нескольких столкновений между частицами, можно заключить, что сначала происходит выравнивание температур между парами вещества мишени и газом-носителем и только после этого вследствие соударений частиц пара друг с другом происходит конденсация паров в наночастицы. Получаемая из теплового баланса оценка равновесной температуры при этом составляет  $\approx 400$  К. Величины пересыщения паров и критического радиуса зародыша по классической теории нуклеации в этих условиях составляют  $S \sim 0,7 \cdot 10^{58}$  и  $r_{crit} \sim 0,5$  Å, что говорит о близости системы к спинопальному распаду и делает термодинамический подход не применимым для описания процесса формирования наночастиц в условиях экспериментов настоящей работы.

В проведенных исследованиях рассматривались нанопорошки диоксида кремния с удельной поверхностью  $18-57$  м<sup>2</sup>/г, что соответствует характерному размеру частиц 151-47 нм, которые состоят из  $\sim 40-1,2 \cdot 10^6$  молекул SiO<sub>2</sub>. Размеры содержащего необходимого количество молекул пара для формирования частиц таких размеров куба составляют 6,6-2 мкм, что соответствуют  $\sim 64-20$  длинам свободного пробега. В соответствии с тепловыми скоростями требуемое для преодоления такого расстояния молекуле время  $\sim 10-1$  нс, что следует считать временным масштабом процесса формирования наночастиц. Такие значения этих параметров соответствуют высоким скоростям охлаждения с доминированием процесса конденсации над процессом коагуляции. Локальность и скоротечность процесса позволяет сформулировать простую модель формирования наночастиц, с

привлечением которой можно выявить влияние основных параметров получения нанопорошков на их характеристики.

Формирование наночастиц происходит непосредственно над поверхностью расплава и можно считать, что в среднем каждую наночастицу образуют все молекулы пара исходного вещества, находящиеся в некотором объеме порядка нескольких длин свободного пробега  $V_{run}$ . Таким образом, средний диаметр частиц  $d_{aver}$  можно связать с концентрацией паров исходного вещества над поверхностью расплава  $c$  как:

$$d_{aver} = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} \langle V \rangle} = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} v_l N} = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} v_l c V_{run}}, \quad (6)$$

где  $\langle V \rangle = \pi \langle d^3 \rangle / 6$  – средний объем одной наночастицы,  $N$  – среднее число молекул, составляющих наночастицу,  $v_l$  – приходящийся на одну молекулу в конденсированном состоянии объем.

Средний размер, легко определяемый по удельной поверхности  $S_{sp}$  получаемого нанопорошка,  $D = 6/\rho S_{sp}$ , где  $\rho$  – плотность вещества наночастиц, разумно считать пропорциональным  $d_{aver}$ . Тогда  $S_{sp} \sim 1/c$ .

Концентрация паров над поверхностью расплава определяется двумя конкурирующими потоками вещества, контролируемые в процессе получения наночастиц: генерацией паров поверхностью расплава и уносом паров проходящим потоком газа. При не полном плавлении мишени (что имеет место, например, при получении нанопорошков диоксида кремния из кварцевого песка) в предположении пропорциональности размеров области эффективного нагрева пройденному электронным пучком в атмосфере расстоянию  $H$  (которое подтверждается результатами экспериментов) и концентрация паров должна быть пропорциональна комбинированному параметру условий получения  $QH^2/W$ , где  $W$  – мощность пучка электронов,  $Q$  – расход газа носителя. Это приводит к связи размерного параметра наночастиц – удельной поверхности нанопорошка  $S_{sp}$  – с параметрами условий получения:

$$S_{sp}^3 \propto \frac{QH^2}{W} \quad (7)$$

Выражение (7) подходит для не расплавляющейся целиком мишени в предположении линейной зависимости концентрации паров  $c$  от мощности  $W$ . Если же говорить о получении нанопорошков из металлических мишеней, то следует ожидать их полного расплавления и испарения материала со всей площади поверхности мишени, что делает зависимость концентрации паров от пройденного пучком в атмосфере расстояния  $H$  не имеющей места. Кроме того, в более общем случае, генерация паров поверхностью расплава соответствует производительности процесса, которая, согласно экспериментальным результатам имеет зависимость от мощности вида  $e^{-W_0/W}$ . Поэтому если интересоваться зависимостью удельной поверхности нанопорошков только от мощности электронного пучка, следует использовать выражение:

$$S_{sp}^3 \propto e^{W_0/W} \quad (8)$$

Зависимость от величины обратной мощности электронного пучка  $1/W$ , такую же как в (7), можно получить из (8), если использовать локальное линейное приближение в этой зависимости там, где касательная этого графика проходит через начало координат.

## 2.2.2. Анализ поведения наночастиц в сложной двухкомпонентной смеси ПДЖК, измерение электрооптических свойств ПДЖК, разработка модели процесса модификации их наночастицами

Проведены исследования допирования ПДЖК на основе полимерной матрицы ПВА и ЖК наполнителя 5СВ. Для допирования использовались нанопорошки  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Охарактеризованы результаты измерения прозрачности плёнок, времен отклика, величин поля срабатывания в зависимости от типа и количества добавок. Показано неоднозначное влияние добавок на электрооптические параметры плёнок ПДЖК. Различия наблюдаются даже в форме откликов плёнок (рис. 2).

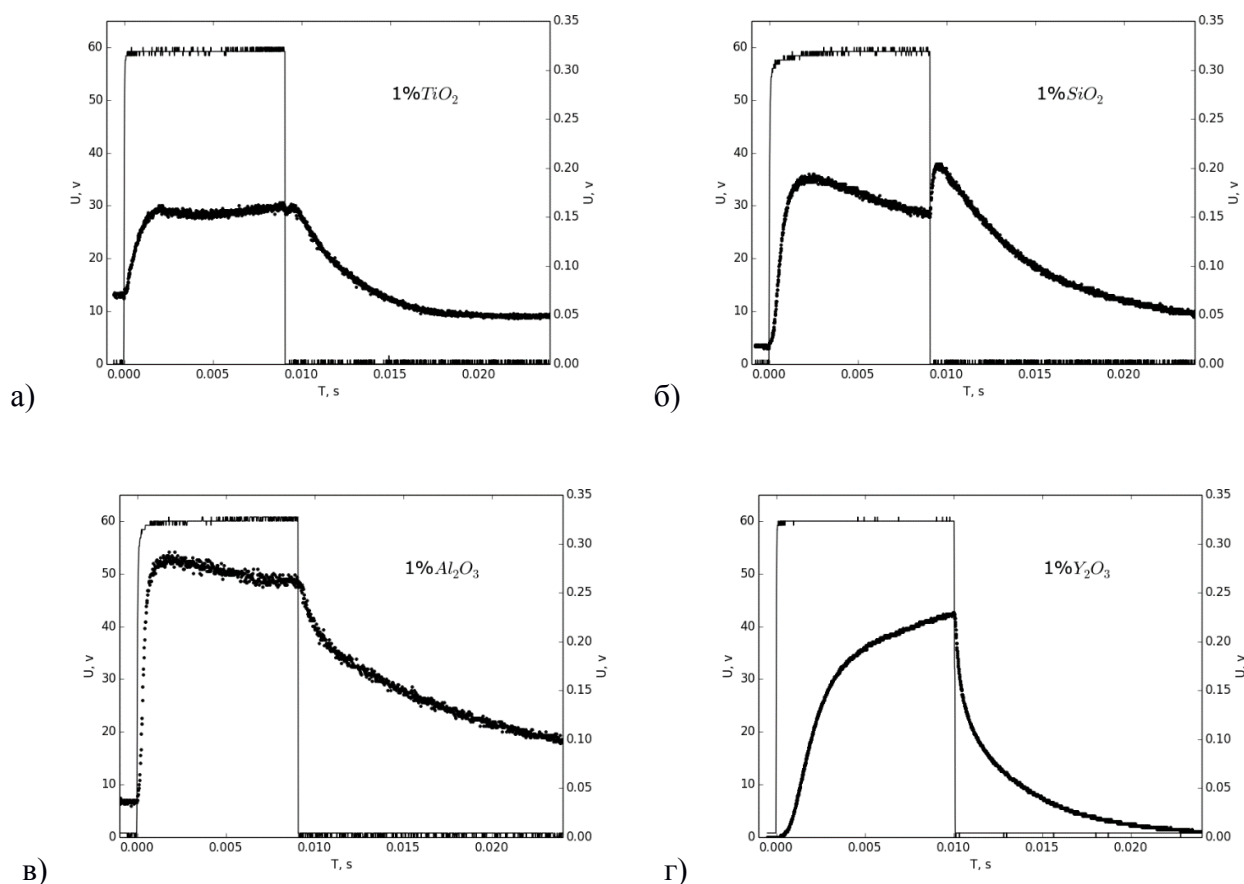


Рис. 2. Осциллограммы оптического отклика ПДЖК с добавками 1% нанопорошков:  $\text{TiO}_2$  (а),  $\text{SiO}_2$  (б),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (в),  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (г). Левая шкала – управляющий сигнал, правая – отклик.

Для описания эффекта влияния нанопорошков  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , полученных методом испарения электронным пучком, удалось построить и апробировать модель разделения процесса перестроения на два подпроцесса: перестроение пристеночного слоя ЖК и объёмной части (индексы  $s$  и  $v$  соответственно). Эти области отличаются силой связи с полимерной поверхностью и, как следствие, скоростью протекания (показатель  $G$ ). Это позволило разделить расчётную модель для спада и подъёма (индексы  $fall$  и  $rise$  соответственно) сигнала  $V(T)$  на две составляющие в форме спадающих экспонент ( $E_{xx}$ ), (формулы 4 и 5, рис. 3).

$$V_{fall} = E_{fs} + E_{fv} = A_s e^{G_{fs}(T+W_s)} + A_v e^{G_{fv}(T+W_v)} \quad (1)$$

$$V_{rise} = V_0 - E_{rs} - E_{rv} = V_0 - A_s e^{G_{rs}(T+W_s)} - A_v e^{G_{rv}(T+W_v)} \quad (2)$$

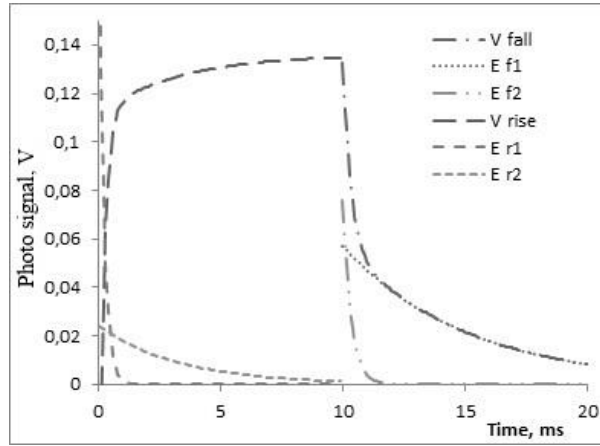


Рис. 3. Схема аппроксимации сигнала оптического отклика ПЖК экспонентами (4) и (5).

Учитывая существующие формулы расчёта времён срабатывания плёнок, представленных формулами 6 и 7, удалось сопоставить полученные при обработке данных измерений результаты с параметрами ПДЖК композиции.

$$G_r = \Delta \varepsilon E^2 / \gamma_1 + k_{33}(l^2 - 1) / \gamma_1 a^2 \rightarrow G_{rs} + G_{rv} \quad (3)$$

$$G_f = k_{33}(l^2 - 1) / \gamma_1 a^2 + 0 \rightarrow G_{fv} + G_{fs} \quad (4)$$

Здесь  $k_{33}$  – коэффициент упругости,  $l$  – отношение полуосей капсулы,  $\Delta \varepsilon$  – диэлектрическая анизотропия ЖК,  $a$  – большая полуось капсулы,  $\gamma_1$  – коэффициент вращательной вязкости НЖК.

Из анализа сигналов откликов вычислены параметры функций спада и подъема (табл. 1). Отмечено, что чем ниже скорость спада  $G_{fs}$  (приповерхностного перестроения), тем больше коэффициент при квадратичном росте показателя  $G_{rs}$ , что свидетельствует об уменьшении силы сцепления ЖК с полимером, вызванное добавкой нанопорошка оксида алюминия, полученного испарением электронным пучком.

Данные показывают существенное влияние нанопорошков на скорость пристеночного процесса ( $G_{fs}$ ,  $G_{rs}$ ), а значит на силу сцепления полимера с жидким кристаллом в приповерхностной области жидкокристаллических капель в полимерной матрице. Сделан вывод о преимущественном расположении наночастиц на поверхности капель ЖК в композите.

Таблица 1. Данные по расчётным параметрам плёнок ПДЖК

Удельная поверхность нанопорошка,	Показатели функции спада		Показатели функции подъёма	
	$G_{fv}$	$G_{fs}$	$G_{rv}$	$G_{rs} (\square\square / \square I)$

м <sup>2</sup> /г				
без добавки	0.31	178	0.45	0.081
39	0.23	3.2	0.48	0.32
53	0.22	6.3	0.3	0.28
114	0.19	7.1	0.34	0.22

### Общие выводы

1. Закончен этап модернизации масштабной установки для нанопорошков оксидов и проведены ее испытания для получения нанопорошков оксида алюминия из промышленного сырья (Результат имеет практическое применение).
2. Впервые проведены расчёты зависимости давления паров различных веществ от температуры с целью сопоставления с характеристиками производительности установки по получению нанопорошков методом испарения электронным пучком; сделан ряд заключений о производительности установки по получению нанопорошков методом испарения электронным пучком.
3. Впервые проведены исследования эволюции примесного состава вещества при его испарении и конденсации в виде наночастиц при их получении методом испарения электронным пучком.
4. Разработан метод оценки условий испарения материала мишени и конденсации паров в наночастицы в процессе их получения методом испарения электронным пучком на основании расчётных зависимостей давления паров различных веществ от температуры и данных об изменении примесного состава вещества.
5. По данным об условиях конденсации паров в виде наночастиц были составлены модельные представления, способные объяснить закономерности влияния таких характеристик, как мощность пучка электронов, пройденное им в атмосфере расстояние до попадания на мишень и расход газа через сублиматор установки, на интегральную размерную характеристику получаемого нанопорошка – его удельную поверхность.
6. Проведены исследования зависимости размеров области эффективного энерговыделения при попадании электронного пучка на мишень от пройденного им расстояния в газовой атмосфере в экспериментах по воздействию электронным пучком на металлические фольги различных материалов.
7. Проведены исследования объёмного профиля распределения температур в мишени из кварцевого песка по форме слитков, полученных вследствие воздействия различной длительности и мощности пучка электронов.
8. Проведены исследования влияния добавок наночастиц оксидов TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на электрооптические свойства плёнок полимерно-дисперсных жидких кристаллов (ПДЖК) на основе полимера ПВА и нематического ЖК - 5СВ. Установлено, что в зависимости от вещества и свойств нанопорошков они могут оказывать существенное положительное влияние на светопропускание, время отклика, пороговое электрическое поле перестройки композиции в целом.
9. Показано на примере анализа электрооптического сигнала плёнок, модифицированных нанопорошками оксида алюминия с различными размерами наночастиц, полученных методом испарения электронным пучком, что процесс перестроения ЖК в полимерной матрице делится на два процесса, отличающихся по скорости протекания. Эти процессы связаны с существованием поверхностной и объёмной области капли ЖК. Установлено, что наночастицы оказывают влияние только на приповерхностную область капли, на которой они концентрируются.

10. Продолжены работы по практическому использованию нанопорошков в современных и новейших отраслях промышленности.

### **2.3. Методы создания и исследования свойств керамических материалов из наноразмерных порошков**

**План-2016** – создание плотной керамики из нанопорошков оксида ниобия и оксида магния на установке горячего прессования “Sinter Land” и исследование свойств полученной керамики (в частности, определение её микротвердости).

Известно, что чем меньше размер зерен керамики и чем больше развита зернистая структура, тем прочнее и тверже керамика. Поэтому целью настоящей работы было создание с помощью метода SPS из нанодисперсных порошков оксида ниобия и оксида магния плотной и твердой керамики с мелкозернистой (менее микрона) структурой.

**Описание экспериментальных условий.** Спекание нанопорошков проводилось на установке Labox “Sinter Land” ИГиЛ СО РАН методом электроискрового спекания (горячего прессования с использованием спекающей искровой плазмы) (Spark Plasma Sintering - SPS), когда импульсы электрического тока проходят через заранее спрессованный порошок (в данных экспериментах сила тока достигала 2 кА при поданном напряжении 3-4 В). Основным отличием SPS от традиционного прессования (при последовательных прессовании и спекании) является подведение импульсного электрического тока непосредственно к образцу, что способствует быстрому нагреву порошка и сохранению в значительной степени его микроструктурных параметров в консолидированном материале. Прессование проводилось при разных максимальных температурах (для оксида ниобия – 600 и 800°С, для оксида магния – 1500 и 1600°С) и давлении 40 МПа. Скорость нагрева обычно была 100°/мин, выдержки при максимальной температуре не было.

В данных исследованиях использовались два порошка:

(1) нанопорошок оксида ниобия  $Nb_2O_5$ , синтезированный российской фирмой «ПлазмоТерм» в потоке термической плазмы, генерируемой в электрическом разряде. Средний размер частиц исходного порошка составлял  $d=60$  нм, а удельная поверхность была  $S=22$  м<sup>2</sup>/г. Порошок обладал следующими свойствами: CAS номер 1313-96-8, чистота 99,9%, цвет – белый, форма частиц равноосная, порошок полидисперсный. Функция распределения частиц по размерам близка к логарифмически нормальной.

(2) нанопорошок оксида магния MgO, также созданный российской фирмой «ПлазмоТерм». Средний размер частиц исходного порошка составлял  $d=25$  нм, а удельная поверхность была  $S=60$  м<sup>2</sup>/г. Порошок обладал следующими свойствами: CAS номер 1309-48-4, чистота 99,6%, цвет – белый, форма частиц сферическая, порошок полидисперсный. Функция распределения частиц по размерам близка к логарифмически нормальной.

Микротвердость всех образцов керамики исследовалась с помощью микротвердомера ПМТ-3.

На электронном сканирующем микроскопе ZEISS EVO-50WDS-XVP-BU ИТПМ СО РАН и атомно-силовом микроскопе Solver P47 производства фирмы NT-MDT (Зеленоград, Россия) исследовались сколы керамики (на электронном сканирующем микроскопе после напыления на них слоя золота).

Рентгенографическое исследование полученной керамики проведено с помощью дифрактометра HZG-4 при монохроматическом Cu-K $\alpha$ -излучении, скорости записи 2 град/мин, напряжении 35 кВ и токе 35 мА.

## Результаты и их обсуждение. Свойства полученной керамики.

### Керамика из нанопорошка оксида ниобия

Диаметр полученных образцов керамики составлял 10 мм, толщина 2,9 мм (при  $T_{\max}=600^{\circ}\text{C}$ ) и 2,2 мм (при  $T_{\max}=800^{\circ}\text{C}$ ), а плотность керамики была  $3,4 \text{ г/см}^3$  (при  $T_{\max}=600^{\circ}\text{C}$ ) и  $4,6 \text{ г/см}^3$  (при  $T_{\max}=800^{\circ}\text{C}$ ).

Рентгенографическое исследование полученной керамики показало, что образец является оксидом ниобия  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  (27-1003) с ромбической структурой, пространственной группой  $\text{Pbam}$  (No. 55) и размерами решетки  $a=6,168 \text{ \AA}$ ,  $b=29,312 \text{ \AA}$  и  $c=3,936 \text{ \AA}$ .

На рис. 4 приведена атомно-силовая микроскопия скола керамики при  $T_{\max}=800^{\circ}\text{C}$ . Видно, что размер зерен полученной керамики порядка 100-150 нм, то есть с помощью метода SPS создана мелкозернистая плотная керамика.

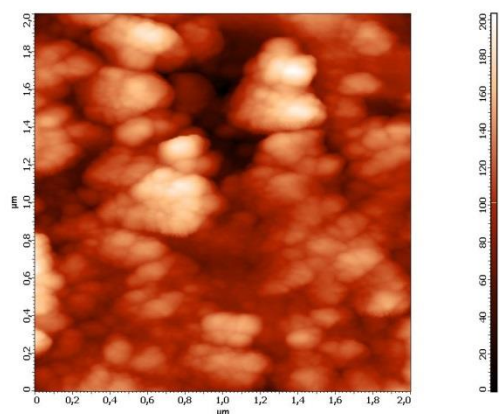


Рис.4. Электронная микроскопия исходного нанопорошка оксида ниобия.

Микротвердость полученной керамики при  $T_{\max}=800^{\circ}\text{C}$  оказалась весьма высокой –  $\text{Hv}=13 \text{ ГПа}$ .

### Керамика из нанопорошка оксида магния

Диаметр и толщина полученных образцов керамики составляли 10 мм и 1,2-1,5 мм, а плотность керамики была  $2,9 \text{ г/см}^3$ .

Рентгенографическое исследование полученной керамики показало, что образец является периклазом (оксидом магния)  $\text{MgO}$  (87-651) с кубической структурой, пространственной группой  $\text{Fm-3m}$  (No. 225) и размером решетки  $a=4,216 \text{ \AA}$ .

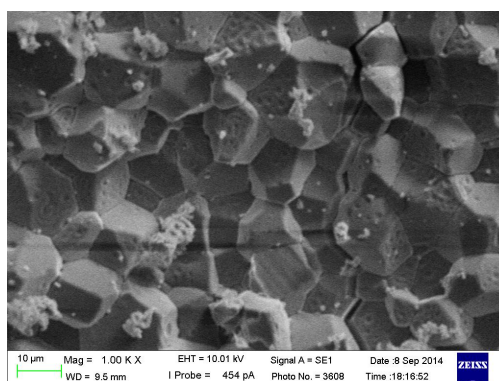


Рис. 5. Электронная микроскопия скола керамики, спеченной при  $T_{\max}=1500^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 5 приведена сканирующая электронная микроскопия скола керамики при  $T_{\max}=1500^{\circ}\text{C}$ . Видно, что размер зерен полученной керамики порядка 10 мкм, и с помощью метода SPS создана плотная керамика.

Микротвердость полученной керамики при  $T_{\max}=1600^{\circ}\text{C}$  оказалась высокой –  $H_v=12,4$  ГПа.

**Заключение.** Таким образом, с помощью метода электроискрового спекания (SPS), на основе наноразмерного порошка оксида магния создана плотная и прочная керамика с микротвердостью 12,4 ГПа, а на основе наноразмерного порошка оксида ниобия создана мелкозернистая (порядка 100-150 нм), плотная, прочная керамика с микротвердостью 13 ГПа.

#### **2.4. Изучение процессов роста пленок субмикронной толщины по оригинальной методике – в сверхзвуковом потоке плазмы, генерируемой МГД-ускорителем. Создание прототипа установки для производства монодисперсных нанопорошков различных соединений и индивидуальных элементов**

В 2016 году была достроена и отлажена новая установка адиабатического сжатия, позволяющая, в том числе, создавать сверхзвуковые двухфазные потоки с твердыми наночастицами. На этой установке были проведены:

- эксперименты по синтезу углеродных и кремниевых наночастиц, наночастиц из карбида кремния, покрытых тонкой углеродной пленкой и наночастиц, состоящих из нанокристаллитов кремния и карбида кремния;
- эксперименты по нанесению слоя наночастиц кремния на твердые поверхности при их обтекании двухфазным потоком, содержащим наночастицы.
- исследования зависимости свойств полученных нанопорошков от условий синтеза.

На рис. 6 (а – в) показана последовательность микрофотографий, полученных с помощью просвечивающей микроскопии. Изучалась зависимость морфологии частиц от концентрации ацетилен, служившего источником углерода, в 10% смеси моносилана в аргоне. На рис.6а показана частица из чистого кремния. Электронная дифракция показывает преобладание кристаллической фазы с характерным для кремния расстоянием между слоями кристалла 0.31 нм. Присутствует аморфная фаза, заполняющая межзеренное пространство и покрывающая поверхность частиц. Размер нанокристаллитов кремния, из которых состоят частицы, заметно превышает 10 нм. Рисунок 6б получен для концентрации, соответствующей половине по углероду от стехиометрической. Наблюдаются как кремниевые кристаллиты (1), так и кристаллиты карбида кремния (2). Расстояние между слоями у этих кристаллитов 0.31 нм и 0.25 нм. Над цифрой 2 можно видеть случайное наложение зерен разного состава, что дало оптическое биение (муаровую картину), по которой можно вычислить разность кристаллических периодов. Поскольку период муаровой картины примерно в 5 раз больше периода кристалла кремния, то разность периодов составляет примерно 20%, что подтверждает образование смеси кристаллитов кремния и карбида кремния. Отметим, что размер кристаллитов менее 5 нм, характерное значение 3 нм.

На рис. 6 в показаны морфология и электронная дифракционная картина порошков, полученных при стехиометрическом составе смеси. Наблюдаются кристаллиты карбида кремния (расстояние между слоями 0.25 нм) со средним размером около 3 нм и аморфная фаза. При дальнейшем увеличении концентрации ацетилен (рис. 1 г) появляется избыток углерода, который образует пленку на поверхности частиц (С).

Обнаружена критическая зависимость размера частиц от добавки ацетилен. На рис. 7 показаны микрофотографии частиц чистого кремния (а) и частиц, полученных в условиях рис.6 б



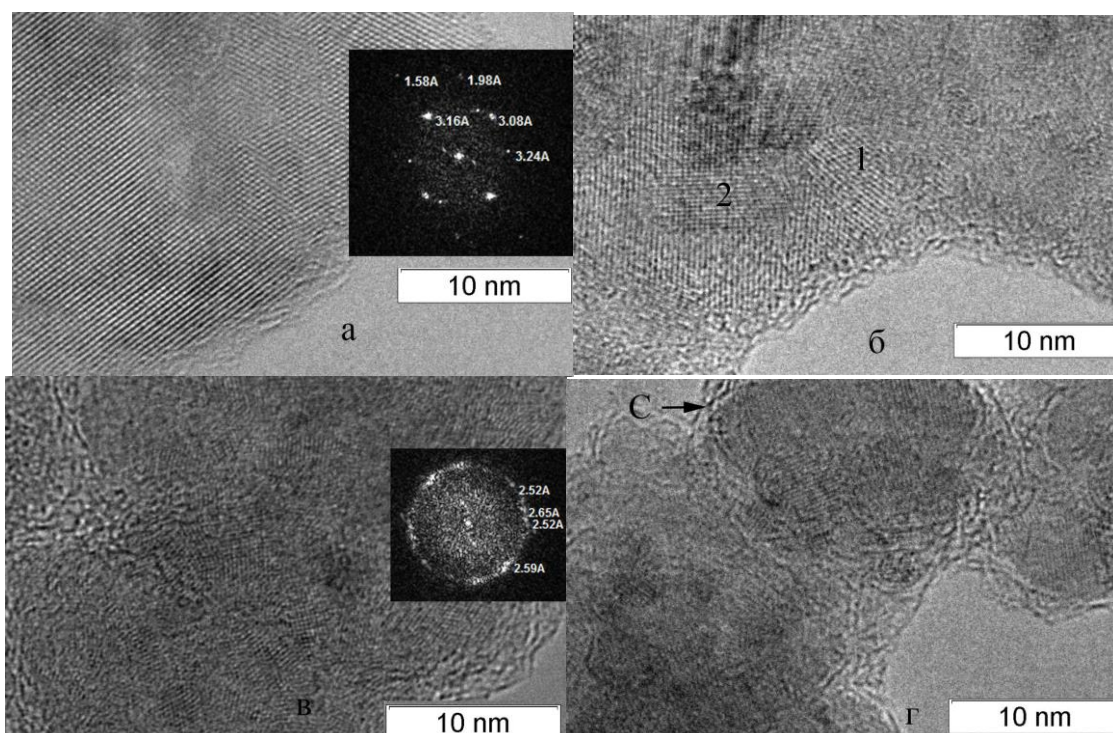


Рис. 6. Зависимость морфологии частиц от концентрации ацетилена а – без ацетилена, б – соотношение концентраций  $C_2H_2:SiH_4=0.25$  (недостаток углерода), в -  $C_2H_2:SiH_4=0.5$  (стехиометрический состав),  $C_2H_2:SiH_4=0.6$  (избыток углерода)

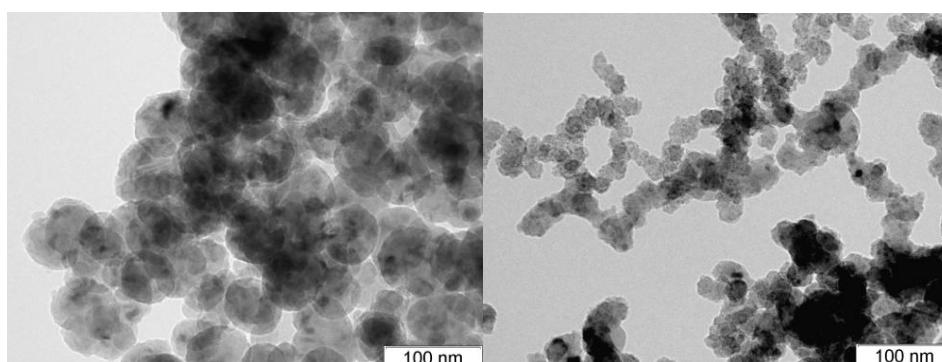


Рис. 7. Вид частиц чистого кремния (слева) и частиц, полученных в условиях рис. 6б

Существенное уменьшение размера частиц при добавлении ацетилена мы объясняем увеличением концентрации центров кристаллизации. При адиабатическом сжатии смеси, содержащей ацетилен, пиролиз ацетилена происходит на ранних стадиях по сравнению с пиролизом моносилана. Это дает повышенную концентрацию центров конденсации на начальной стадии пиролиза моносилана по сравнению со случаем использования чистого моносилана и, следовательно, большее количество частиц и их меньший размер после окончания процесса сжатия.

Результаты исследования углеродного покрытия на частицах карбида кремния, получаемых в поршневом реакторе при значительном избытке углерода, приведены на рис. 8. Частицы получены при двукратном относительно стехиометрической превышении концентрации ацетилена. На микрофотографиях хорошо заметны плотные ядра частиц из карбида кремния и менее плотные углеродные покрытия. Спектр рамановского рассеяния (рис.8 С) содержит G- и D-

максимумы примерно равной интенсивности, что является характерной особенностью углерода в форме графена. Рентгеноструктурный анализ (рис.8 D) также демонстрирует узкие пики графена и пики карбида кремния. Таким образом, можно считать, что метод адиабатического сжатия позволяет синтезировать наночастицы карбида кремния, покрытые графеном.

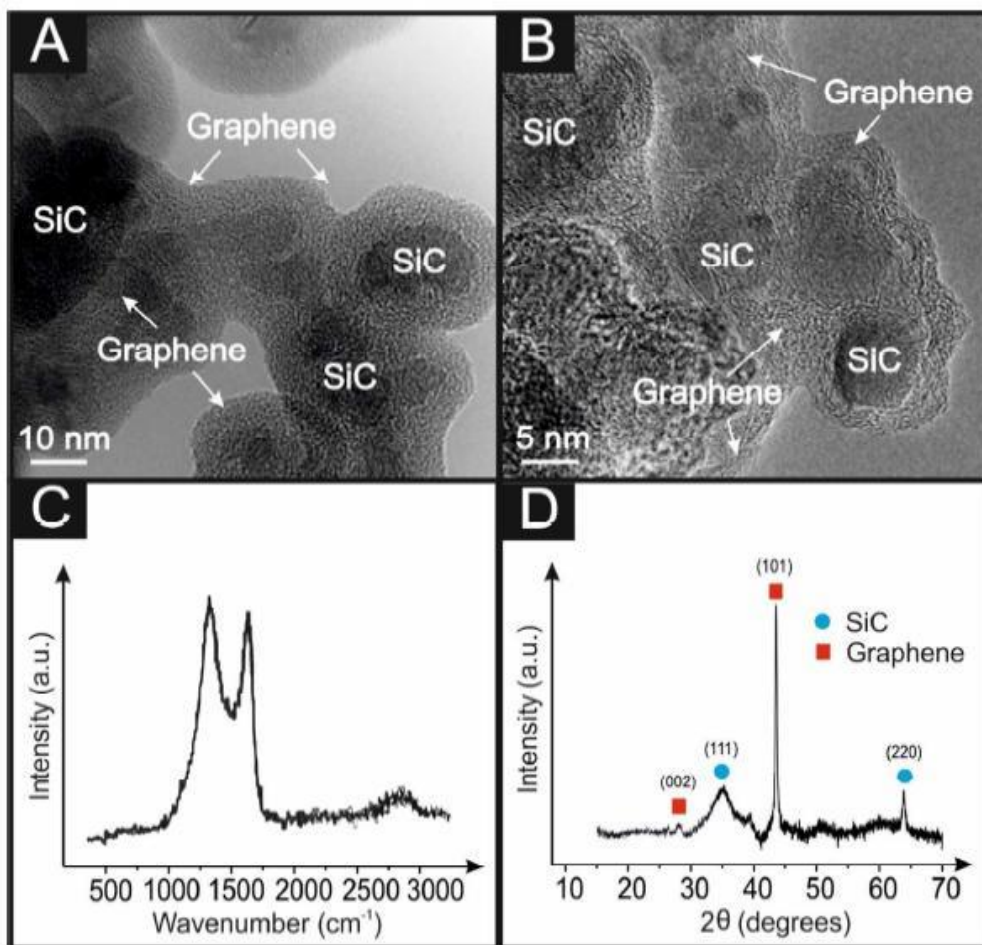


Рис. 8. Микрофотографии (А, В), спектр рамановского рассеяния и РСА частиц.

Было проведено изучение зависимости структуры наночастиц, получаемых в поршневом реакторе при пиролизе ацетилена, добавленного в гелий, от ускоряющего поршень давления газа, задающего скорость движения поршня и конечную степень сжатия. На рис. 9 показаны изображения наночастиц углерода, полученные на просвечивающем электронном микроскопе. При увеличении ускоряющего давления слева направо упорядоченность структуры частиц увеличивается. На двух фотографиях слева наблюдаются плоские слои (нанокристаллы графита) среди аморфного вещества. Правая фотография демонстрирует качественный переход к образованию концентрических слоев углерода (к так называемой «луковичной» структуре).

В результате пиролиза ацетилена в условиях адиабатического сжатия при трех значениях давления толкающего газа 0.5, 0.7 и 0.9 МПа были получены углеродные наночастицы и проведено сравнительное исследование параметров сжимаемого газа, морфологии и химического строения углеродных наночастиц, которые являются продуктами реакции, и электрохимических свойств суперконденсаторов на их основе. Было установлено, что в момент адиабатического сжатия реакционный газ, состоящий из 10% смеси ацетилена и гелия, нагревается до температуры 400 °С, 600 °С или 750 °С в зависимости от давления толкающего газа 0.5, 0.7 или 0.9 МПа. Методом просвечивающей электронной микроскопии было выявлено, что углеродные наночастицы имеют сферическую форму размером от 20 до 60 нм и средним значением 38 нм. Наночастицы, полученные при низкой степени сжатия (0.5 МПа) имеют аморфное строение, а при

высокой степени сжатия (0.7 или 0.9 МПа) имеют слоистую структуру. Данные рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и NEXAFS-спектроскопии, показали, что углеродные наночастицы состоят из  $sp^2$ -гибридизированного, аморфного и гидрированного углерода и не более 15ат% поверхностных атомов углерода, образует связь с кислородом. Установлено, что углеродные наночастицы, полученные при низкой степени сжатия (0.5 МПа), состоят из аморфного гидрогенизированного углерода с маленькой концентрацией полициклических ароматических групп. При максимальных параметрах сжатия сформировались частицы, слои которых имеют электронное строение близкое к графиту. Размер и степень упорядочения графеновых слоев, из которых состоят наночастицы, увеличивается при увеличении давления толкающего газа от 0.7 до 0.9 МПа. Сравнение электрохимических характеристик суперконденсаторов с электродами из углеродных наночастиц, показало, что емкость меняется от 9.4 до 0.7 Ф/г и зависит как от скорости изменения потенциала, так и от строения углеродных наночастиц. Совокупность рентгеноспектральных данных и анализа электрохимического импеданса показали, что электроды из углеродных наночастиц, полученных при давлении 0.5 МПа, с малой концентрацией  $sp^2$ -гибридизированных атомов углерода являются плохими проводниками электрического тока, однако ионы электролита хорошо проникают между аморфными частицами или их структурными единицами. Использование в качестве электродов, углеродных наночастиц с более высокой концентрацией  $sp^2$ -гибридизированных атомов углерода приводит к увеличению емкости суперконденсатора за счет увеличения их электронной проводимости. Диффузия ионов электролита затруднена в углеродных наночастицах, полученных при наибольшей степени сжатия ацетилена, в которых образовались наиболее протяженные и упорядоченные графеновые слои, что привело к уменьшению их емкостных характеристик.

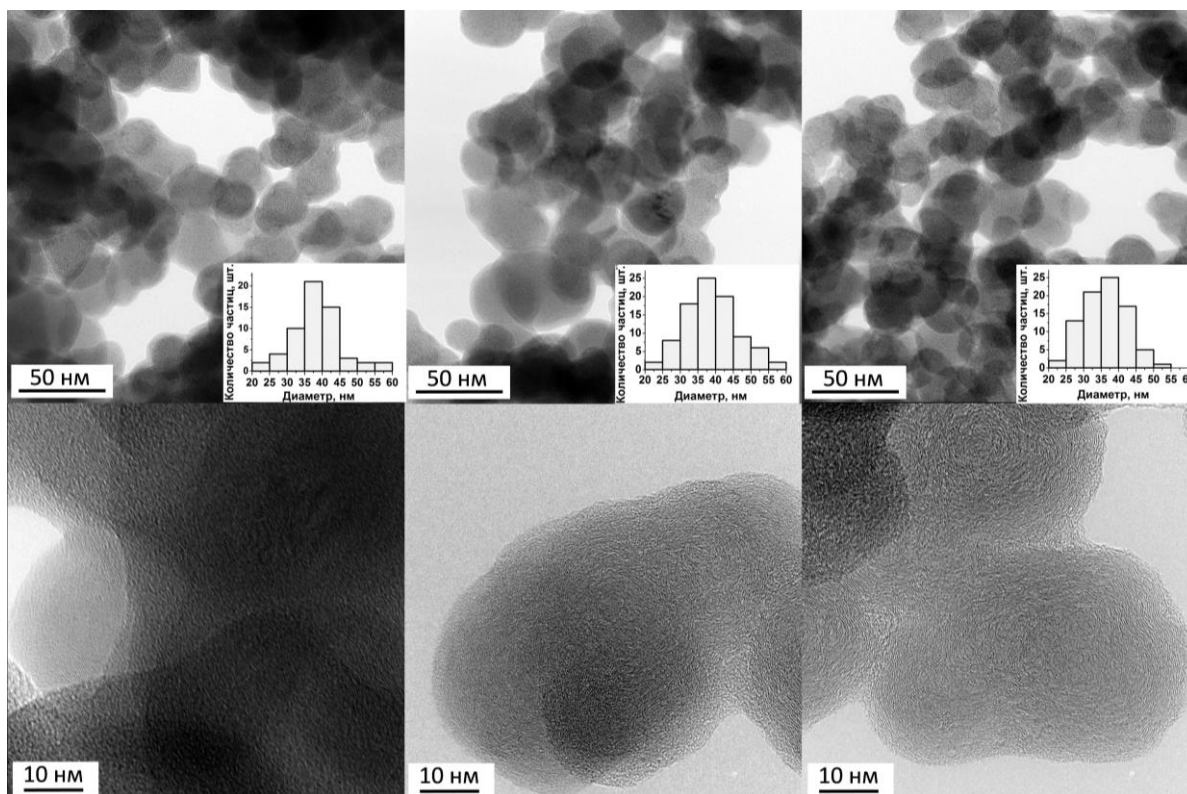


Рис. 9. ПЭМ (наверху) и ПЭМ ВР (внизу) – изображения углеродных наночастиц, полученных при трех значениях давления толкающего газа 1– 0.5 МПа, 2– 0.7 МПа и 3– 0.9 МПа. На вставках представлено распределение частиц по диаметру.

Материалы, полученные в экспериментах по нанесению слоя наночастиц кремния на твердые поверхности и в эпоксидный компаунд при их обтекании двухфазным потоком, содержащим наночастицы, в настоящее время обрабатываются.

В результате проведенных исследований:

1. получены результаты как мирового уровня (находятся на рецензии в Journal of Materials Chemistry A), так и значимые для химии наноматериалов (статья направлена в ДАН) и для РФ (статья направлена в ЖСК)
2. были получены новые знания для междисциплинарных (например, механика – химия, электрохимия) научных исследований
3. полученные результаты соответствуют поставленным целям и задачам
4. результаты представлены качественно, с использованием материалов, направленных для опубликования
5. фундаментальные результаты, представленные в статье, направленной в Journal of Materials Chemistry A предполагается развить до практического применения. Остальные результаты являются фундаментальными и служат основой для дальнейших исследований

## **2.5. Нестационарные задачи механики композитных материалов и конструкций.**

Цель блока проекта заключается в построении общей теории и разработке практических методов расчета неупругого динамического поведения различных типов волокнистых, слоистых и слоисто-волокнистых композитных тонкостенных конструкций при воздействии высокоинтенсивных термосиловых нестационарных нагрузок, при высокочастотных колебаниях и динамических нагрузках ангармонического типа.

### **2.5.1. Разработка модели и выполнение математического анализа задач динамического поведения при воздействии ударных и локальных нагрузок на плоские конструкции с произвольным контуром из однородных и композитных материалов.**

В качестве завершающего этапа исследований, выполняемых в течение 2013-2016 по исследованию квазистатических и динамических процессов деформирования неоднородных стержневых конструкций подготовлена и опубликована монография «Структурно-неоднородные профилированные стержневые системы. Методы рационального и оптимального проектирования», в которой рассмотрены постановка прямых и обратных задач рационального и оптимального проектирования плоских стержневых систем, составленных из структурно-неоднородных стержневых элементов при учете нелинейных факторов деформирования. Предложены непрерывно-дискретные многоточечные критерии деформационных процессов разрушения при различных условных ограничениях. Выполнено обобщение расчетных критериев на случаи многовариантного и динамического нагружений. Разработаны методы решения соответствующих оптимальных задач. Разработанные общетеоретические подходы были использованы при решении важных проблем, возникающих в практике проектирования разнообразных конструктивных элементов. В частности, исследованы особенности процессов деформирования и разрушения железобетонных балок и арок различных поперечных сечений с различными структурами армирования. Определены зависимости между силовыми параметрами нагружения, физико-механическими характеристиками фазовых материалов и геометрическими параметрами сечений конструкций, при которых обеспечивается минимальный уровень растягивающих напряжений в бетоне. Исследованы особенности процессов деформирования и механизмов разрушения гибридных многопролетных клеевых деревянных балок и дерево-бетонных мостовых сооружений, активно используемых в строительной индустрии в Северных и Восточных районах нашей страны. Для конструкций из полиметаллических материалов рассмотрены задачи рационального и оптимального проектирования стержневых и плоских конструкций, обеспечивающих их максимальную несущую способность и жесткость. На основе модели жестко-пластических материалов с упрочнением получены новые аналитические решения динамического деформирования слоистых и армированных балок и пластин при учете эффектов упрочнения фазовых материалов.

## **Нестационарные задачи механики композитных материалов и конструкций**

Плоские тонкостенные изделия различных односвязных и двусвязных геометрических форм являются важнейшими силовыми и защитными элементами ответственных объектов атомной энергетики, химической промышленности, строительной индустрии, авиакосмической и машиностроительной техники. При анализе работоспособности и надежности таких конструкций в аварийных и чрезвычайных ситуациях, а также при создании таких элементов методами импульсной штамповки первостепенное значение имеет задача оперативного и надежного расчета их прочности и повреждаемости при воздействии кратковременных интенсивных динамических нагрузок.

Для численного интегрирования уравнений динамики тонкостенных элементов конструкций используют как явные, так и неявные численные схемы. Из явных методов наибольшее распространение получили различные варианты схемы «крест», реже используется явные методы Рунге–Кутты (МРК). Из неявных методов наиболее частое применение нашли методы Ньюмарка, реже используются метод Хубольта (схема с опережением) или неявные МРК. Для интегрирования соответствующих уравнений могут быть использованы и обобщенные МРК, разработанные ранее участниками проекта. Поэтому в рамках настоящего проекта особое внимание было уделено исследованию устойчивости явных и неявных обобщенных МРК, а также схемам типа «крест», применительно к решению динамических задач для композитных тонкостенных элементов конструкций, изготовленных из упругих, упругопластических и вязкопластических фазовых материалов.

### **2.5.2. Исследование предельного состояния и динамического поведения полигональных и криволинейных армированных пластических плит при воздействии взрывных нагрузок.**

На основе модели идеального жесткопластического материала с использованием структурной модели армированного слоя с одномерным напряженным состоянием в волокнах, построено общее решение задачи о динамическом изгибе мозаично-армированных металлокомпозитных трехслойных квадратных пластин, шарнирно опертых или защемленных по контуру, находящихся под действием динамической нагрузки взрывного типа. Несущие слои расположены симметрично относительно срединной поверхности и армированы волокнами арматуры из различных материалов. Волокна расположены мозаично в направлениях, параллельных к контурам пластины. Схема деформирования пластины состоит из совокупности жестких областей в форме трапеций и центральной прямоугольной области. Получены уравнения динамического деформирования и проанализированы условия реализации разных схем деформирования. Определены предельные нагрузки, время деформирования и остаточные прогибы пластин. Найденная предельная нагрузка соответствует определению несущей способности рассматриваемых пластин по второму предельному состоянию. В качестве примера рассмотрены три случая мозаичного армирования. Показано, что для рассматриваемых случаев при шарнирном опирании контура пластины деформируются одинаково, а при защемлении контура изменение структур мозаичного армирования существенно влияет на значения предельных нагрузок и остаточных прогибов. Получено, что при условии одинакового расхода арматуры и уменьшении толщины несущих слоев предельная нагрузка возрастает. При этом наибольшая предельная нагрузка и наименьший остаточный прогиб будут в случае, когда направление армирования перпендикулярно опорному контуру в каждой четверти квадратной пластины, разделенной диагоналями. Полученные решения могут быть использованы для оценки динамической повреждаемости мозаично-армированных металлокомпозитных трехслойных квадратных пластин в условиях кратковременного импульсивного нагружения.

На базе той же структурной модели построено общее решение задачи динамического изгиба гибридных ортогонально армированных металлокомпозитных слоистых полигональных пластин с жесткой шайбой, шарнирно опертых или защемленных по контуру, находящихся под действием динамической нагрузки взрывного типа. Получено, что в случае постоянных

параметров армирования в каждом слое, материал пластины можно считать квазиизотропным, а для расчета допустимо использовать схемы деформирования, разработанные для однородных пластин, с заменой в них соответствующих предельных изгибающих моментов и поверхностной плотности материала. Определены предельная нагрузка и остаточные прогибы армированных пластин.

В рамках модели идеального жесткопластического тела рассмотрено предельное поведение гибридных композитных круглых пластин. Построено точное решение задачи изгиба трехслойных круглых пластин, имеющих разную структуру углового армирования в верхнем и нижнем слое. Материал среднего слоя и связующего в верхнем и нижнем слоях имеет пределы текучести на сжатие намного больше, чем на растяжение. В этом случае условие пластичности в плоскости главных моментов, построенное на основе структурной модели армированного слоя с одномерным напряженным состоянием в волокнах, имеет вид прямоугольника. Пластины шарнирно оперты по внутреннему круговому контуру и имеют в центральной части жесткую круглую вставку. Пластины находятся под действием осесимметричной поверхностной нагрузки. Показано, что в зависимости от расположения опорного контура, структуры армирования, распределения приложенной нагрузки возможны несколько схем предельного деформирования пластин; определены условия их реализации. Найдены поля главных моментов и скорости прогибов пластины. Получены простые аналитические выражения для предельной нагрузки. Определено оптимальное расположение опоры, при котором пластина имеет наименьшую повреждаемость с точки зрения максимума предельной нагрузки. Показано, что на оптимальной опоре образуется пластический шарнир. Получено, что при увеличении амплитуды приложенной распределенной нагрузки в несколько раз значения предельных нагрузок уменьшатся во столько же раз, при этом месторасположение оптимальной опоры не изменится. Полученные решения могут быть использованы для оценки несущей способности трехслойных железобетонных пластин.

Построена математическая модель кинематически допустимого поведения жесткопластической круглой пластины переменной толщины под действием равномерно распределенной по поверхности нагрузки взрывного типа. Пластина шарнирно оперта по круговому контуру, расположенному внутри области пластины, внешний ее контур свободен. Получены простые аналитические выражения для верхней предельной нагрузки и максимального остаточного прогиба. Определено оптимальное расположение опоры, при котором пластина имеет наименьшую повреждаемость с точки зрения максимума верхней предельной нагрузки.

Разработана методика определения несущей способности ослабленных ледяных нагружаемых площадок, которые моделируются идеальной жесткопластической пластиной, расположенной на несжимаемом основании. Пластина имеет свободно опертый или защемленный произвольный кусочно-гладкий криволинейный внешний контур. В центральной части пластины расположено произвольное свободное отверстие. Толщина пластины уменьшается при приближении к границе отверстия. На пластину действует нагрузка, локально распределенная около отверстия по области произвольной формы. Приложенная нагрузка является произвольной функцией координат. Учитывается свойство разной сопротивляемости льда при растяжении и сжатии. Решение построено на основе принципа виртуальной работы. В зависимости от геометрических параметров пластины рассмотрены два варианта кинематически допустимого деформирования. В обеих схемах деформирования центральная часть пластины при воздействии нагрузки движется в направлении действия нагрузки, а область около границы, вследствие несжимаемости основания, движется в противоположном направлении. Введена криволинейная ортогональная система координат, связанная с внешним криволинейным контуром пластины, в которой удобно проводить вычисления двойных интегралов, описывающих решение задачи. Получены аналитические выражения для предельных нагрузок. Определены две интегральные характеристики приложенной нагрузки и показано, что в случае действия на пластину различно распределенных поверхностных нагрузок, у которых эти две характеристики совпадают, пластина будет иметь одинаковые предельные нагрузки. В качестве примера рассмотрена шарнирно опертая и защемленная пластина в форме эллипса с линейной функцией толщины, находящаяся под

действием нескольких видов локальных поверхностных нагрузок. Предлагаемая методика позволяет рассчитать несущую способность ослабленных криволинейных ледяных площадок и оценить степень ее возможного увеличения при увеличении нагружаемой области и при перераспределении нагрузки по области нагружения.

На основе модели идеального жесткопластического материала получено общее решение задачи о предельном и динамическом поведении пластин произвольной формы, шарнирно опертых по неподвижному криволинейному контуру, расположенному внутри области пластины. В центральной части пластины расположена жесткая вставка криволинейной формы. Пластина находится под действием равномерно распределенной по поверхности динамической нагрузки высокой интенсивности взрывного типа, амплитуда которой в начальный момент незначительно превышает предельные значения нагрузки, поэтому схема движения пластины совпадает со схемой предельного деформирования. Показано, что в зависимости от расположения опоры пластины могут деформироваться по трем схемам. При всех схемах пластина деформируется в виде линейчатых поверхностей, разделенных шарнирными линиями с нормальным изгибающим моментом, равным предельному значению. На основе принципа виртуальной мощности в сочетании с принципом Даламбера для каждого из механизмов получены определяющие уравнения и определены условия их реализации. Получены простые аналитические выражения для предельной нагрузки и максимального остаточного прогиба пластины. Получены алгебраические уравнения для определения оптимального расположения опорного контура, соответствующего наибольшему значению предельной нагрузки пластины и, следовательно, наименьшей ее повреждаемости. В качестве примеров рассмотрены овалы пластины, опертые на эллиптический контур, квадратные пластины с круглой внутренней опорой и с круглой центральной жесткой вставкой, круглые пластины с круглым жестким центром и круглой внутренней опорой. Получено, что внутренняя опора является оптимальной, если на ней образуется пластический шарнир. Показано, что изменяя расположение опорного контура в криволинейной пластине с жесткой вставкой, можно найти такие положения, при которых эта пластина будет наиболее прочной.

### **2.5.3. Разработка численно-аналитической модели и исследование особенностей неупругого динамического поведения армированных гибких искривленных панелей в рамках неклассической теории, учитывающей их ослабленное сопротивление поперечному сдвигу**

Разработан общий алгоритм исследования спектральной устойчивости обобщенных многостадийных МРК разных порядков точности применительно к численному интегрированию по времени начально-краевой задачи для параболического уравнения второго порядка. Выражение для функции спектральной устойчивости получено в двух альтернативных формах: на основе матричных соотношений и в детерминантном виде. Исследована конкретная реализация разных явных обобщенных МРК и их спектральная устойчивость. Показано, что все явные обобщенные МРК обладают условной спектральной устойчивостью и свойством условной монотонности численного решения по времени, нарушение которого приводит к возникновению ложных осцилляций приближенного решения. Функция устойчивости для этих методов является полиномиальной. Продемонстрировано: в случае использования двухстадийных явных обобщенных МРК получаются схемы типа предиктор-корректор; в случае задачи нестационарной одномерной теплопроводности на базе одностадийного обобщенного МРК получается условно устойчивая классическая двухслойная явная конечно-разностная схема на четырехточечном шаблоне. Выявлено, что из всех исследованных явных обобщенных МРК наименее слабым условием спектральной устойчивости обладает пятистадийный обобщенный метод Рунге – Кутты – Мерсона. Рассмотрены конкретные реализации разных неявных обобщенных МРК применительно к численному интегрированию по времени начально-краевой задачи для параболического уравнения второго порядка и исследована их спектральная устойчивость. Показано, что все неявные обобщенные МРК безусловно спектрально устойчивы, но некоторые из них обладают свойством условной монотонности численного решения по времени. Функции

спектральной устойчивости неявных обобщенных МРК являются рациональными. Проведено сравнение аналитического решения задачи диффузии с ее численными решениями, полученными разными неявными обобщенными МРК. Продемонстрировано, что в этом случае применение одностадийных методов Радо с последующей дискретизацией задачи по пространственной переменной приводит к классической конечно-разностной схеме с опережением (схеме Лаасонена), а использование одностадийного метода Гаусса – Лежандра – к шеститочечной симметричной схеме (схеме Кранка – Николсона). Показано, что диагонально неявные обобщенные методы Нёрсетта и Барриджа реализуются примерно так же, как и одностадийные методы Радо и Гаусса – Лежандра, но имеют точность по временному шагу на один – три порядка большую. На основе сопоставления численных и аналитических решений установлено, что для получения практически пригодных численных решений без каких-либо ограничений на шаг по времени целесообразно использовать одно- и трехстадийные обобщенные методы Радо или двух- и четырехстадийные методы Лобатто ШС. Все остальные явные и неявные обобщенные МРК требуют введения ограничений на шаг по времени. Проведенные исследования носят фундаментальный характер и в дальнейшем могут быть использованы для эффективного решения связанных термоупругопластических задач динамического деформирования композитных конструкций, для организации эффективных итерационных процедур, которые необходимо использовать на каждом шаге по времени при решении динамических упругопластических задач методами Ньюмарка, Хубольдта или неявными обобщенными МРК, а также при решении динамических задач для армированных композитных конструкций, изготовленных из вязкопластичных материалов.

На основе пошагового алгоритма с привлечением центральных конечных разностей по времени разработаны математические модели упругопластического деформирования продольно-армированных балок-стенок, а также плоско-армированных пластин и криволинейных панелей с изотропно упрочняющимися материалами компонентов композиции, которая позволяет в дискретные моменты времени получать решение упругопластической задачи по явной схеме. В приближении Кармана сформулированы начально-краевая задача динамического поведения гибких композитных балок-стенок, пластин и пологих оболочек. При этом учитывается их ослабленное сопротивление поперечному сдвигу. С единых позиций получены разрешающие уравнения, соответствующие неклассическим теориям типа Тимошенко, Рейсснера – Миндлина и Редди. Построены явные схемы типа «крест» для численного интегрирования поставленных начально-краевых задач, согласованные с пошаговым алгоритмом, использованным для моделирования упругопластического поведения армированной среды. Проведены расчеты динамического поведения различно армированных стеклопластиковых балок-стенок и прямоугольных удлиненных пластин при их упругопластическом цилиндрическом изгибе. Показано, что структура армирования существенно влияет на упругопластическое динамическое поведение таких конструкций. Выявлено, что классическая теория балок, пластин и криволинейных панелей, как правило, вообще не приемлема для проведения соответствующих расчетов (разве что для весьма тонких элементов композитных конструкций), а первый вариант теории Тимошенко или теория Рейсснера дают вполне приемлемые результаты только в случаях относительно тонких конструкций, армированных низко модульными волокнами. Для расчетов упругопластического поведения армированных балок-стенок, пластин и пологих оболочек рекомендовано использовать, как более точные, второй вариант теории Тимошенко и теорию Редди.

В рамках деформационной теории пластичности исследованы особенности механического поведения гибридных изгибаемых композитных балок, которые имеют нерегулярную слоистую структуру и состоят из стенок и полок (несущих слоев). Стенки могут быть армированы волокнами продольно или перекрестно в своей плоскости, а несущие слои армируются в продольном направлении. На базе гипотез теории Тимошенко сформулирована нелинейная граничная задача расчета таких конструкций, что позволило учесть ослабленное сопротивление их стенок поперечным сдвигам. Для линеаризации поставленной краевой задачи использован метод



переменных параметров упругости. На конкретных примерах изучено изгибное деформирование однородных и армированных консольных и двухопорных балок под действием распределенной поперечной нагрузки при нормальной и высокой температурах. Поперечные сечения рассматриваемых балок представляют собой двутавры. Продемонстрировано, что при высокой температуре даже для однородных металлических двутавровых балок теория Бернулли не обеспечивает приемлемой для инженерных расчетов 5 %-й точности определения их податливости. В случае балок, армированных высокомодульными волокнами, классическая теория становится вообще неприемлемой даже при нормальной температуре, так как в ряде случаев занижает расчетную податливость балок на десятки процентов. Показано, что для адекватного описания механического поведения армированных слоистых балок особенно при высоких температурах необходимо учитывать в их стенках активно развивающиеся деформации поперечных сдвигов. Обнаружено, что в таких условиях в композитных балках могут возникнуть ярко выраженные краевые эффекты, которые не описывает классическая теория. Полученные результаты в дальнейшем следует учитывать при построении теорий термоупругопластического изгибного деформирования армированных сэндвич-панелей.

На основе определяющих соотношений термоупругопластичности деформационного типа впервые сформулирована задача механического поведения изгибаемых перекрестно армированных пластин. Получены уравнения, позволяющие с разной степенью точности определять напряженно-деформированное состояние таких пластин с учетом их ослабленного сопротивления поперечным сдвигам. Из этих уравнений, как частные случаи, вытекают соотношения классической теории и неклассических теорий Рейсснера и Редди. Для осесимметрично нагруженных и армированных кольцевых пластин, жестко закрепленных на одной кромке и равномерно нагруженных на другой кромке, разработан упрощенный вариант уточненной теории, сложность реализации которого сопоставима со сложностью теорий Рейсснера и Редди. Проведены конкретные расчеты термоупругопластического изгиба таких пластин при разных уровнях теплового воздействия. Показано, что как для относительно толстых, так и относительно тонких армированных пластин в некоторых случаях ни классическая теория, ни традиционные неклассические теории Рейсснера и Редди не гарантируют получения надежных результатов по определению прогиба даже в рамках грубой 10 %-й точности. Выявлено, что при изгибе плоско-армированных пластин в ряде случаев (например, при высоких температурах) в окрестности опорных кромок возникают ярко выраженные краевые эффекты, характеризующие срез этих конструкций в поперечном направлении. Традиционные теории, имеющие низкие порядки аппроксимаций поперечных сдвигов либо вообще не позволяют выявить эти локальные эффекты (классическая теория), либо выявляют их с очень грубой точностью. Продемонстрировано, что для адекватного расчета изгибного поведения армированных пластин, материалы компонентов композиции которых деформируются линейно-упруго, вполне достаточно использовать теорию Редди.

### **3. Заключение**

Все представленные решения задач получены впервые.

За период 2013-2016 гг. проведены уникальные эксперименты, впервые исследовано взаимодействие кордиеритовой керамики, представляющей собой периодическую структуру с протяженными каналами со сверхзвуковыми струями. Эксперименты и численное моделирование показали перспективность данного направления исследования, когда после прохождения преднагревателя возможно за счет многократного отражения ударных волн в каналах носителя катализатора производить аномальный нагрев рабочего газа до температур проведения реакций. Данная задача является междисциплинарной, что подчеркивает ее актуальность. Достигнутые в рамках проекта результаты соответствуют поставленным задачам и могут служить основой для проведения дальнейших НИР и НИОКР. Другое направление, развитие которого начато в рамках проекта связано с комбинацией пиролизического реактора и каталитического, изготовленного на основе тканного материала. Исследование закономерностей взаимодействия сверхзвуковых

высокоэнтальпийных струй с податливыми материалами (soft matter) также является актуальной задачей современной прикладной газовой динамики.

Закончен этап модернизации масштабной установки для нанопорошков оксидов и проведены ее испытания для получения нанопорошков оксида алюминия из промышленного сырья (Результат имеет практическое применение). Впервые проведены расчёты зависимости давления паров различных веществ от температуры с целью сопоставления с характеристиками производительности установки по получению нанопорошков методом испарения электронным пучком; сделан ряд заключений о производительности установки по получению нанопорошков методом испарения электронным пучком. Впервые проведены исследования эволюции примесного состава вещества при его испарении и конденсации в виде наночастиц при их получении методом испарения электронным пучком. Разработан метод оценки условий испарения материала мишени и конденсации паров в наночастицы в процессе их получения методом испарения электронным пучком на основании расчётных зависимостей давления паров различных веществ от температуры и данных об изменении примесного состава вещества. По данным об условиях конденсации паров в виде наночастиц были составлены модельные представления, способные объяснить закономерности влияния таких характеристик, как мощность пучка электронов, пройденное им в атмосфере расстояние до попадания на мишень и расход газа через сублиматор установки, на интегральную размерную характеристику получаемого нанопорошка – его удельную поверхность. Проведены исследования зависимости размеров области эффективного энерговыделения при попадании электронного пучка на мишень от пройденного им расстояния в газовой атмосфере в экспериментах по воздействию электронным пучком на металлические фольги различных материалов. Проведены исследования объёмного профиля распределения температур в мишени из кварцевого песка по форме слитков, полученных вследствие воздействия различной длительности и мощности пучка электронов. Проведены исследования влияния добавок наночастиц оксидов  $TiO_2$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Y_2O_3$  на электрооптические свойства плёнок полимерно-дисперсных жидких кристаллов (ПДЖК) на основе полимера ПВА и нематического ЖК - 5СВ. Установлено, что в зависимости от вещества и свойств нанопорошков они могут оказывать существенное положительное влияние на светопропускание, время отклика, пороговое электрическое поле перестройки композиции в целом. Показано на примере анализа электрооптического сигнала плёнок, модифицированных нанопорошками оксида алюминия с различными размерами наночастиц, полученных методом испарения электронным пучком, что процесс перестроения ЖК в полимерной матрице делится на два процесса, отличающихся по скорости протекания. Эти процессы связаны с существованием поверхностной и объёмной области капли ЖК. Установлено, что наночастицы оказывают влияние только на приповерхностную область капли, на которой они концентрируются. Продолжены работы по практическому использованию нанопорошков в современных и новейших отраслях промышленности.

На основе наноразмерных порошков 8 оксидов (оксидов кремния, олова, цинка, железа, меди, магния, ниобия, алюминия) с помощью метода электроискрового спекания (SPS) создана плотная, твердая (с микротвердостью вплоть до 24 ГПа) и прочная керамика с мелкозернистой структурой (с размером зерна вплоть до 100-150 нм). Микротвердость такой керамики существенно выше микротвердости керамики, полученной традиционным методом (при последовательных прессовании и спекании). Полученные результаты соответствуют поставленным целям и задачам научного исследования. Результат при дальнейшей доработке может иметь практическое применение.

Работы по формированию наноструктурированных пленок и синтезу наночастиц методом адиабатического сжатия позволили сделать следующие основные выводы. Продемонстрированы возможности образования наноструктурированных покрытий на твердых поверхностях, обтекаемых плазмой, генерируемой МГД-ускорителем. Были получены сплошные кремниевые покрытия и покрытия в виде нитей кремния, покрытия из октаэдрических нанокристаллов карбида кремния, сплошные покрытия из нитрида кремния. Продемонстрирована высокая чувствительность датчиков паров спиртов, созданных на базе углеродных покрытий, наносимых с

помощью МГД-ускорителя. Углеродные покрытия, получаемые с помощью МГД-ускорителя при определенных условиях, могут содержать нанокристаллы алмаза с размерами менее 5 нм. Методом адиабатического сжатия синтезированы нанопорошки, состоящие из наночастиц с высокой степенью монодисперсности: углерода, кремния, карбида кремния, покрытого углеродной пленкой. В зависимости от условий синтеза могут быть получены порошки как из аморфного, так и поликристаллического кремния. Обнаружено, что углерод, покрывающий наночастицы карбида кремния, находится в фазе графена. Предложена физическая модель образования наночастиц в реакторе адиабатического сжатия, объясняющая возникновение электризации синтезируемых частиц и ИК излучения из реакционного объема. Построенные установки позволяют и в дальнейшем получать новые фундаментальные знания о процессах синтеза наночастиц и наноструктурированных покрытий, что предоставит новые технологические возможности

На основе модели жесткопластического тела построены общие решения задач для оценок несущей способности и анализа динамического поведения однородных изотропных и композитных гибридных слоистых пластин, находящихся под действием динамических взрывных и локальных нагрузок. Рассматриваемые пластины являются разнообразными по форме контура и толщине, различно закреплены, в том числе по контуру, находящемуся внутри области пластины. Разработаны методики для определения несущей способности усиленных жесткой вставкой или армированием геосинтетическими волокнами, или ослабленных полынью ледяных нагружаемых площадок произвольной формы, которые моделируются идеальной жесткопластической пластиной, расположенной на несжимаемом основании.

Сформулирована задача вязкопластического динамического деформирования металлокомпозитных цилиндрических оболочек. Разработан оригинальный численный метод интегрирования поставленной начально-краевой задачи, базирующийся на последовательной дискретизации области определения решения сначала по времени, а затем по пространственным переменным. Исследовано влияние структур армирования на динамическое поведение вязкопластических металлокомпозитных цилиндрических оболочек разной длины при фронтальных нагрузках взрывного типа. Показано, что для определенных композиций армирование оболочек приводит к резкому увеличению их динамической сопротивляемости. Обнаружено, что существуют композиции, при использовании которых, армирование тонкостенной конструкции приводит к уменьшению ее динамической сопротивляемости. На основе метода шагов по времени разработана численно-аналитическая методика моделирования упругопластического деформирования армированного металлокомпозитного слоя с изотропно упрочняющимися фазовыми материалами, позволяющая в дискретные моменты времени рассматривать компоненты композиции как нелинейно-упругие с начальным напряженным состоянием. Получены соотношения, описывающие изгибное деформирование армированных балок-стенок с различной степенью точности, из которых как частные случаи получаются классическая теория Бернулли и оба варианта теории Тимошенко. Исследована практическая устойчивость схемы «крест» и спектральная устойчивость обобщенных методов Рунге – Кутты применительно к задачам динамики тонкостенных композитных элементов конструкций. На основе схемы «крест» разработана численно-аналитическая модель динамического поведения упругопластических армированных гибких балок и пластин с учетом их ослабленного сопротивления поперечным сдвигам. Проведен сравнительный анализ поведения таких конструкций, рассчитанных в рамках классической теории и двух вариантов теории Тимошенко.

## 4. Публикации

### 4.1. Основные

1. Постников, Б.В., Порсин, А.В., Ломанович, К.А. Нагрев натекающей сверхзвуковой струей внутренних полостей носителя катализатора периодической структуры // Письма в ЖТФ. 2016. (направлена в печать)

2. I V Chepkasov, Yu Ya Gafner, K V Zobov, S B Batoroev and S P Bardakhanov. Synthesis of Cu nanopowders by condensation from the gas phase // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 110 (2016) 012020 doi:10.1088/1757-899X/110/1/012020.
3. V. Chepkasov, Yu. Ya. Gafner, S. L. Gafner, and S. P. Bardahanov. Condensation of Cu Nanoparticles from the Gas Phase // ISSN 0031-918X, The Physics of Metals and Metallography, 2016, Vol. 117, No. 10, pp. 1003–1012. © Pleiades Publishing, Ltd., 2016 (Original Russian Text © I.V. Chepkasov, Yu.Ya. Gafner, S.L. Gafner, S.P. Bardahanov, 2016, published in Fizika Metallov i Metallovedenie, 2016, Vol. 117, No. 10, pp. 1037–1047).
4. Nomoev, A. V., Bardakhanov, S. P., Syzrantsev, V. V., Lygdenov V. Ts. Determination of thermal conductivity of silica dioxide Tarkosil T-50 nanopowder by laser flash technique // Journal of Engineering Thermophysics, 2016. No 2. V 25, pp. 174-181 (Номоев А.В., Бардаханов С.П., Сызранцев В.В, Лыгденов В.Ц. Определение теплопроводности нанопорошка диоксида кремния «таркосил» Т-50 методом лазерной вспышки).
5. Андрей Мищенко, Юрий Немировский. Структурно-неоднородные профилированные стержневые системы. Методы рационального и оптимального проектирования (Монография) Ю Palmarium Academic Publishing, 2016, 322 с.
6. Немировский Ю.В. Динамика гибридных прямоугольных пластических плит. Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева, Серия: Механика предельного состояния, 2016, №1(27), с. 115-121
7. Немировский Ю.В., Болтаев А.И. Напряженно-деформированное состояние железобетонных трапециевидных и эллиптических балок, Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific journal | МАТЕМАТИКА FYZYKA), v.6, 2016, p. 151-161
8. Немировский Ю.В. Динамическое поведение полиметаллических круглых пластин из упрочняющихся материалов. Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева, Серия: Теория предельного равновесия, 2016, №. 3, с. 3-10
9. Немировский Ю.В., Бабин А.И., Сальский Е.А. Термонапряженное состояние многослойного полиармированного однополосноо гиперболоида вращения // Научный вестник НГТУ, 2016, т. 64, № 3, НГТУ, с. 106-116
10. Немировский Ю.В., Бабин А.И., Сальский Е.А. Термонапряженное состояние многослойных полиармированных геликоидальных оболочек. Доклады Высшей Школы, 2016, № 4
11. Немировский Ю.В., Бабин А.И. Связанная задача термоупругости слоистых композитных оболочек вращения. Теоретические аспекты проблемы // Математические методы и физико-механические поля (НАН Украины, г. Львов), 2016, в. 59, №2, с. 98-109
12. Немировский Ю.В., Федорова Н.А. Предельные деформации термоупругих плоских конструкций с криволинейным армированием // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. М.Ф. Решетнева, т. 17, №1, 2016, с. 73-78
13. Y.V. Nemirovskii, A.V. Mishenko, R.F. Terletskii. Dynamic calculation of composite bars under thermal and force. Journal of Mathematical Sciences, vol. 207, No.2, July 2016, p. 1-16
14. Немировский Ю.В. Оптимальное проектирование гибридных тавровых конструкций по предельно допустимым деформациям. Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева, Серия: механика предельного состояния, 2016, № 3, с. 74-81
15. Немировский Ю.В., Тихонов С.В. Предельное состояние железобетонных балок Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева, Серия: механика предельного состояния, 2016, № 3, с. 129-153
16. Немировский Ю.В., Болтаев А.И. Некоторые особенности деформирования нелинейного разносопротивляющегося материала однопролетных балок // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета 2016, № 4, с. 95-126, Томск, ТГАСУ, 2016.

17. Немировский Ю.В., Болтаев А.И. Особенности деформирования и разрушения деревянных клеевых многопролетных балок. Сообщение 1 // Известия вузов. Строительство, 2016, № 6, с. 116-126, НГАСУ (СИБСТРИН)
18. Немировский Ю.В., Болтаев А.И. Особенности деформирования и разрушения деревянных клеевых многопролетных балок. Сообщение 2 // Известия вузов. Строительство., 2016, № 7, с. 83-91, НГАСУ (СИБСТРИН)
19. Лысенко В.И. Создание и свойства керамики из нанопорошка оксида ниобия // Физика и химия стекла. – 2016. – Т.42, № 5. – С.109-112.
20. Lysenko V.I. Creation and Properties of Ceramics from Niobium Oxide Nanopowder // Glass Physics and Chemistry. – 2016. – V.42, No.5. – P.522-524].
21. Лысенко В.И. Керамика из нанопорошка оксида магния: создание и свойства // Наноиндустрия. – 2016. – No.4. – С.94-97.
22. Романова Т.П. Моделирование динамического поведения мозаично-армированных трехслойных квадратных пластин // Проблемы прочности и пластичности. – 2016. – Т. 78, № 2. – С. 145-155.
23. Романова Т.П. Оптимальное расположение внутренних опор к круглым жесткопластическим пластинам переменной толщины // Международный научно-технический журнал “Теоретическая и прикладная механика”, Белорусский Национальный тех. ун-т (Минск, Беларусь). – 2016. – Вып. 31. – С. 29-35.
24. Романова Т.П. Несущая способность нагружаемых ослабленных ледяных пластин криволинейной формы переменной толщины // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 3. – С. 148–163. DOI: 10.15593/pern.mech/2016.3.10.
25. Янковский А.П. Уточненная модель изгибного деформирования слоистых балок-стенок регулярной структуры из нелинейно-упругих материалов // Конструкции из композиционных материалов. – 2016. – № 1. – С. 18–29.
26. Янковский А.П. Исследование особенностей неупругого деформирования композитных балок слоисто-волокнутой структуры при термосиловом нагружении // Проблемы прочности и пластичности. – 2016. – Т. 78, № 2. – С. 131–144.
27. Янковский А.П. Применение явного по времени метода центральных разностей для численного моделирования динамического поведения упругопластических гибких армированных пластин // Вычислительная механика сплошных сред. – 2016. – Т. 9, № 3. – С. 279–297.

#### **4.2. Труды конференций и тезисы докладов**

1. I.K. Chakin, S.P. Bardakhanov. Electron beam technology for production of nanopowders // Program and Abstracts of 2016 Japan-Russia Joint Seminar “Advanced Materials Synthesis Process and Nanostructure” in conjunction with 2015 Annual Meeting of Excellent Graduate Schools for “Materials Integration Center” and “Materials Science Center”, March 18-19, 2016, Tohoku University, Sendai, Japan, page 20, <http://takuetsu2015.imr.tohoku.ac.jp>.
2. Ядыкин В.А., Труфанов Д.Ю., Бардаханов С.П. Керамические наноматериалы для доочистки воды городского водопровода // Наука. Промышленность. Оборона: Труды XVII Всероссийской научно-технической конференции (Новосибирск, 20-22 апр. 2016 г.)/ Под ред. С.Д. Саленко. -Т.1. -Новосибирск, 2016. -С. 336-342.
3. Chang-Myung Lee, Vladimir Goverdovskiy and Sergey Bardakhanov. Nanopowdered modifiers in improving a protective coating system // Proceedings of 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2016), June 1-3, 2016, CD-ROM, IEEE Catalog Number CFP16786-PRT, ISBN

- 978-1-5090-0853-7, ISBN 978-5-7782-2917-4 (Part 1), Novosibirsk State Technical University, p. 124-127.
4. Сызранцев В.В., Викулина Л.С., Бардаханов С.П., Номоев А.В. Дифференциация наночастиц через фрактальную размерность // Proceedings of VI International Conference “Nanomaterials and Technologies”, V Sino-Mongolian-Russian Conference on Materials Science, II Sino-Mongolian-Russian Conference on Functional Materials, August 22-26, 2016 – Baikal Lake, Enkhaluk, Russia, pp. 195-202.
  5. С.П. Бардаханов, А.П. Завьялов, И.К. Чакин. Технология газофазного синтеза нанопорошков на ускорителе электронов // Proceedings of VI International Conference “Nanomaterials and Technologies”, V Sino-Mongolian-Russian Conference on Materials Science, II Sino-Mongolian-Russian Conference on Functional Materials, August 22-26, 2016 – Baikal Lake, Enkhaluk, Russia, Conference Program, p. 24.
  6. С.П. Бардаханов. Технология газофазного синтеза нанопорошков на ускорителе электронов // Доклад на научной сессии Объединенного ученого совета по химическим наукам СО РАН, 13 сентября 2016 г., Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, г. Новосибирск, Повестка заседания, с. 1.
  7. С.П. Бардаханов. Технология газофазного синтеза нанопорошков на ускорителе электронов // Доклад на научной сессии Секции наук о материалах Отделения химии и наук о материалах Российской академии наук, 12-16 сентября 2016 г., Москва, Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Программа научной сессии, с. 6.
  8. Marina Serebryakova, SergeyDimov, Sergey Bardakhanov and Sergey Novopashin. Thermal conductivity, viscosity and rheology of nanofluids based on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles and ethylene glycol-water mixtures // Book of Abstracts, International Symposium and School of Young Scientists INTERFACIAL PHENOMENA AND HEAT TRANSFER, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia, March 2-4, 2016, p. 24. Website: <http://www.itp.nsc.ru/html/symposium-16/>
  9. Немировский Ю.В., Моховнев Д.В., Стасюк Н.П. Оптимизация параметров нагружения в бетонных арках // НАУКА, ПРОМЫШЛЕННОСТЬ, ОБОРОНА // Труды XVII Всероссийской, научно-технической конференции, Новосибирск, НГТУ, 2016, т.1, с. 135-140
  10. Немировский Ю.В. Станиславович А.В. Расчет теплопроводности гибридных железобетонных конструкций. Вестник Сургутского госуниверситета. Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные вопросы строительства». Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 2016, с. 46-54
  11. Немировский Ю.В., Федорова Н.А. Обратная задача криволинейно армированных пластин с равной трещиностойкостью связующего материала // Математическое моделирование и краевые задачи. Труды десятой Всероссийской научной конференции с международным участием (25-27 мая 2016), часть 1, Самара, СамГУ, с. 155-158
  12. Немировский Ю.В., Бабин А.И. Неклассическая задача теплопередачи в многослойных композитных кольцевых пластинках, Современные технологии в кораблестроительном и авиационном образовании, науке и производстве: сборник докладов Всероссийской научно-практ. конф.; НГТУ им. Р.Е. Алексева. Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева. Типография ННГТУ., 2016, с. 370-373
  13. Немировский Ю.В., Станиславович А.В. Тепловое сопротивление сотовых слоистых конструкций, Современные технологии в кораблестроительном и авиационном образовании, науке и производстве: сборник докладов Всероссийской научно-практ. конф.; НГТУ им. Р.Е. Алексева. Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева. Типография ННГТУ., 2016, с. 373-378.

14. Немировский Ю.В., Станиславович А.В. Моделирование теплопроводности гибридных бетонных композитных материалов. Международная конференция «Математика и информационные технологии в нефтегазовом комплексе», посвящённая дню рождения великого русского математика академика П. Л. Чебышёва: Тезисы. Издательский Центр СурГУ. 2016, с. 247-248
15. Романова Т.П. Моделирование динамического поведения гибридных ортогонально армированных слоистых полигональных пластин с жесткой шайбой под действием взрывных нагрузок // Наука. Промышленность. Оборона: Труды 17-й Всероссийской научно-технической конференции (НПО-2016, Новосибирск, 20-22 апреля 2016). – Новосибирск: НГТУ, 2016. – С. 184-190.
16. Романова Т.П. Оптимальное расположение криволинейных внутренних опор к жесткопластическим пластинам произвольной формы с жесткой вставкой // Труды Международной научно-технической конференции «VII Чаплыгинские чтения», посвященной 146-летию со дня рождения выдающегося русского ученого-аэродинамика С. А. Чаплыгина (7-8 апреля 2015 г.) / под ред. А.Н. Серьезнова, В.К. Белова, В.Н. Николаева, В. Л. Чемезова. – Новосибирск: Из-во НГТУ, 2016. – С. 345–364.

Приложение 1

индикатор	Ед. измерения	Всего за 2013-2016 гг.	2013	2014	2015	2016
Количество публикаций в ведущих российских и международных журналах по результатам исследований, полученных в процессе реализации проекта	единиц	<b>96</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>27</b>
Количество публикаций в мировых научных журналах, индексируемых в базе данных «Сеть науки» (WEB of Science)	единиц	<b>21</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>9</b>	<b>3</b>
Число тезисов в конференциях	единиц	<b>52</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>20</b>	<b>16</b>
Число охраняемых объектов интеллектуальной собственности: зарегистрированных патентов в России зарегистрированных патентов за рубежом	единиц единиц	<b>1</b>	<b>1</b>			