

**ПРОГРАММА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ПРЕЗИДИУМА РАН № 25**

**«Фундаментальные проблемы механики и смежных наук в  
изучении многомасштабных процессов в природе и технике»**

**РАЗВЕРНУТЫЙ ОТЧЕТ**

**Координаторы программы:**

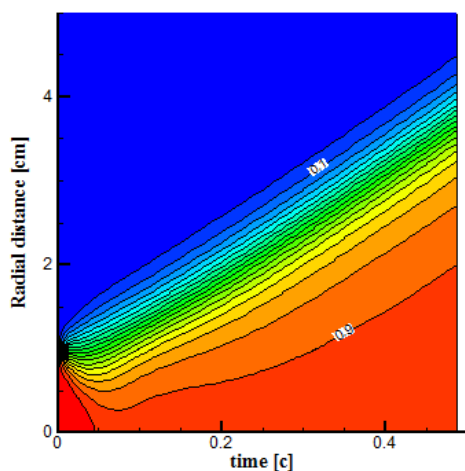
**академик И.Г. Горячева**

**академик Н.Ф. Морозов**

## **Оглавление**

<b>Направление 1:</b> Фундаментальные проблемы физико-химической механики гиперзвукового полета в атмосфере Земли и других планет, аэродинамика и теплообмен элементов конструкции летательных аппаратов с учетом релаксации, излучения и свойств современных материалов.....	<b>3</b>
<b>Направление 2:</b> Фундаментальные проблемы использования магнито-плазменных технологий в перспективной аэрокосмической технике (для управления полетом, снижения сопротивления, управления потоками в трактах двигателей, уменьшения воздействия на окружающую среду и т.п.)	<b>10</b>
<b>Направление 3:</b> Многомасштабные модели прочности и работоспособности материалов: от наноуровня до реальных конструкций .....	<b>23</b>
<b>Направление 4:</b> Развитие моделей континуальной и дискретной механики для описания процессов, при которых происходит нарушение сплошности или изменение структуры материалов – в силу дискретности вещества (наносистемы, гранулированные среды) или в силу особенности происходящих процессов (разрушение, агломерация, структурные и фазовые переходы) .....	<b>48</b>
<b>Направление 5:</b> Развитие моделей биомеханики применительно к разработке методов исследования процессов в живых организмах .....	<b>59</b>

# Направление 1: Фундаментальные проблемы физико-химической механики гиперзвукового полета в атмосфере Земли и других планет, аэродинамика и теплообмен элементов конструкции летательных аппаратов с учетом релаксации, излучения и свойств современных материалов



четы показали, что изменения формы корреляционной функции скаляра при учете влияния изменений плотности таковы, что соответствует увеличению скорости скалярной диссипации. Показано, что влияние конкретного значения коэффициента молекулярной диффузии не проявляется в режимах развитого горения, получены закономерности расширения зоны горения и зависимость скорости распространения турбулентного пламени от интенсивности химической реакции. На рисунке изображено развитие зоны горения (среднее значение полноты сгорания), возникающей от сферического образования продуктов горения в условиях однородной изотропной стационарной турбулентности.

В рамках уравнений Навье-Стокса с учетом физико-химических явлений, характерных для высокотемпературного газа, выполнено численное исследование обтекания и теплообмена спускаемого аппарата в атмосфере Марса (Громов В.Г., Левин В.А., НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва). Расчеты проведены с использованием ранее разработанного авторами программного комплекса HIGHTEMP, в котором реализованы термодинамические модели различной сложности, включая программы расчета переноса селективного излучения и соответствующие базы данных. Конфигурация тела, картина линий тока и поле температур, полученные в расчетах с использованием однотемпературной газофазной модели ST и модели химически нейтральной поверхности, показаны на рис. 1. За телом образуется область возвратно-циркуляционного течения, имеющая форму, близкую к конической. Длина самого большого вихря составляет более 6 м, а максимальный поперечный размер почти в два раза больше диаметра «хвоста» аппарата. Второй по размеру вихрь занимает почти всю область уступа за лобовым щитом. Уровень температуры в отрывной области потока определяется температурой газа в пограничном слое на лобовой поверхности и составляет 1400-1500 К. В точке торможения на оси потока температура поднимается до 2200 К. В скачке уплотнения, образующемся в донной области течения, температура также повышается до 2000 К. Большое влияние на радиационный нагрев подветренной стороны поверхности в IR-диапазоне оказывает узкая область тече-

ния за ударной волной с достаточно высокой плотностью газа и температурой порядка 3000-4000 К.

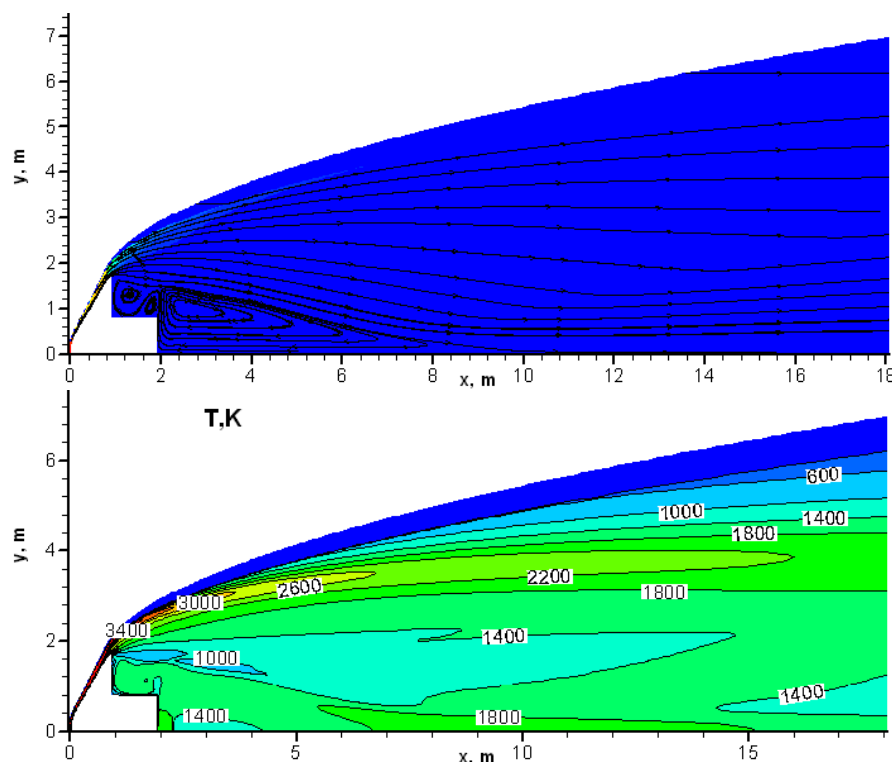


Рис. 1 Картина линий тока и поле температур в рассматриваемой области течения (однотемпературная газозная модель ST, химически нейтральная поверхность).

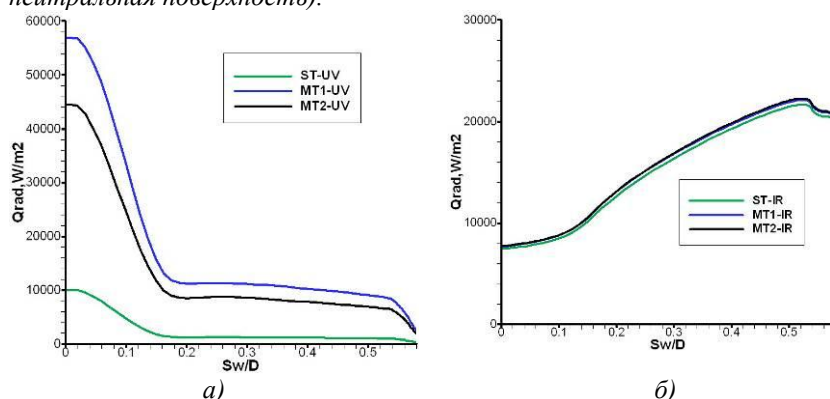


Рис. 2 Распределение ультрафиолетового (а) и инфракрасного (б) радиационного теплового потока вдоль наветренной стороны поверхности аппарата для трех газозных моделей (химически нейтральная поверхность).

модели газа и модели поверхностного катализа для рассмотренных условий незначительна (Рис. 2б). Слабое влияние оказывает на расчетную величину инфракрасного радиационного теплового потока учет неравновесной заселенности колебательных уровней молекул окиси и двуокиси углерода.

На индукционном плазматроне ВГУ-4 исследовано воздействие дозвуковых и недорасширенных сверхзвуковых струй высокоэнтальпийного воздуха и азота, истекающих из сопла диаметром 16 мм, на выполненные из графита модели различной формы (цилиндр с плоским торцом, цилиндр со сферическим притуплением, конус со сферическим притуплением) (Колесников А.Ф., Соловьев Н.Г., ИПМех РАН, Москва). В сверхзвуковом режиме максимальная температура поверхности 3150°C достигнута на цилиндрической модели с плоским торцом диаметром 15 мм. Максимальная температура поверхности достигнута

Для рассмотренных условий наибольшее влияние на конвективный тепловой поток к поверхности аппарата оказывает каталитическая активность поверхности. Влияние этого фактора на радиационный поток много меньше. Влияние термической неравновесности на конвективный тепловой поток мало как для наветренной, так и подветренной стороны поверхности аппарата. Расчетная величина радиационного теплового потока к наветренной стороне поверхности в ультрафиолетовом диапазоне существенно зависит от выбора термической модели (в приближении локального термодинамического равновесия) и практически не зависит от каталитических свойств поверхности (Рис. 2а). Чувствительность расчетных значений радиационного теплового потока в инфракрасном диапазоне к выбору термической

в дозвуковом режиме на модели, имевшей форму конуса с углом раствора  $30^\circ$  и радиусом сферического притупления 5 мм, при расстоянии 15 мм от выходного сечения сопла до критической точки модели, максимальной мощности ВЧ-генератора 72 кВт и расходе воздуха 6 г/с. Термоизображение модели из графита во время испытания в этом режиме приведено на рис.3, на котором справа представлено распределение температуры по вертикальной линии сканирования. Максимальная температура  $3417^\circ\text{C}$  реализуется в точке пересечения линии сканирования с горизонтальной риской.

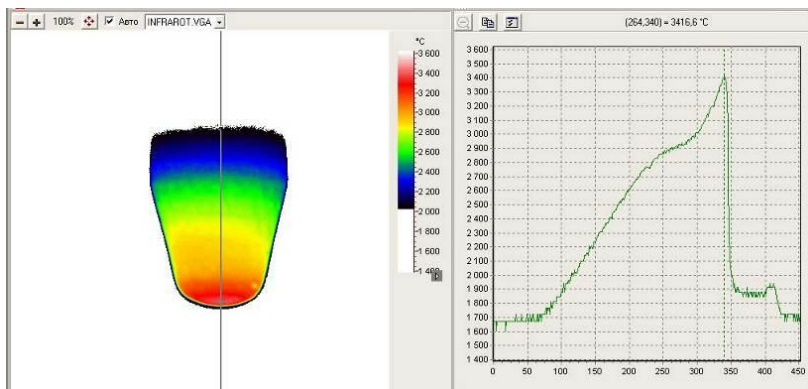


Рис. 3 Термоизображение модели из графита, обтекаемой дозвуковой струей высокоэнтальпийного воздуха индукционного плазматрона ВГУ-4

терогенной рекомбинации  $\gamma_w$  экспериментально обнаруженного эффекта длительного выхода на стационарное значение теплового потока к водоохлаждаемому датчику с серебряной поверхностью для условий испытаний в дозвуковом потоке плазмы  $\text{CO}_2$  при давлении 80 и 100 гПа. Определен эффективный коэффициент рекомбинации атомов О и молекул СО на поверхности серебра в зависимости от времени воздействия, характеризующий динамику поверхностного катализа. Исследованы способы имитации радиации Солнца в области вакуумного ультрафиолета и выяснены возможности использования плазмы непрерывного оптического разряда (НОР) для имитации воздействия солнечного излучения во всех спектральных диапазонах начиная от ВУФ до ИК.

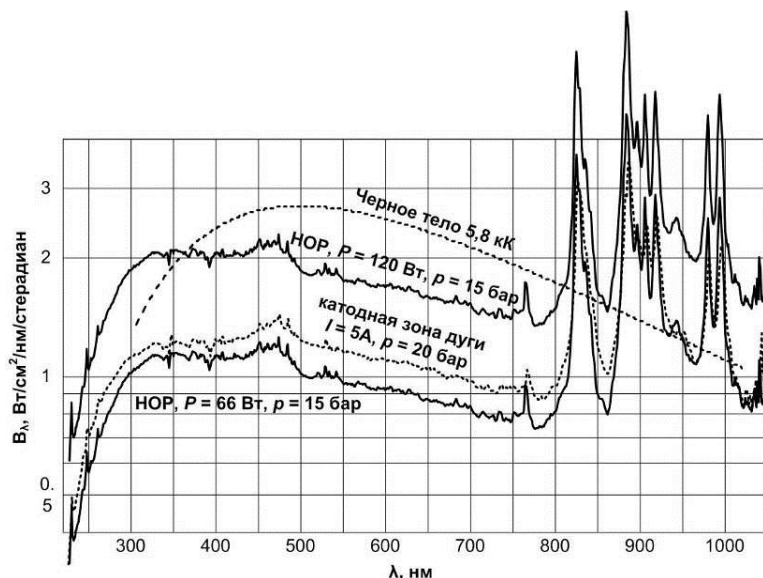


Рис. 4 Яркость плазмы непрерывного оптического разряда в ксеноне в сравнении с яркостью катодной зоны дуговой ксеноновой лампы и поверхностной яркостью Солнца

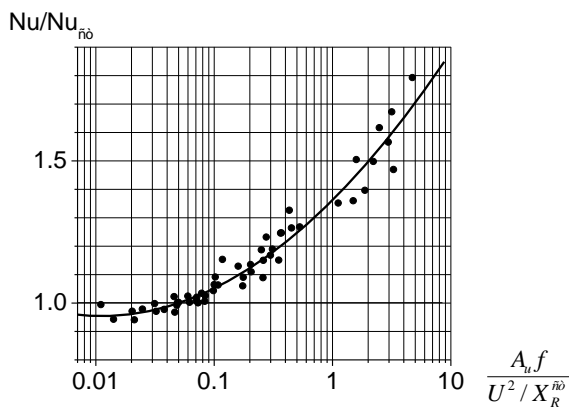
мощности лазера над пороговой яркость плазмы НОР превышает максимальную яркость

При указанных выше параметрах в сверхзвуковом режиме температура в критической точке модели составила  $2650^\circ\text{C}$ . В дозвуковой струе диссоциированного азота максимальная температура носка затупленного конуса  $3350^\circ\text{C}$  близка к температуре, реализованной в воздушной струе. Проведены расчеты, иллюстрирующие влияние на определение энтальпии и эффективного коэффициента гетерогенной рекомбинации  $\gamma_w$  экспериментально обнаруженного эффекта длительного выхода на стационарное значение теплового потока к водоохлаждаемому датчику с серебряной поверхностью для условий испытаний в дозвуковом потоке плазмы  $\text{CO}_2$  при давлении 80 и 100 гПа. Определен эффективный коэффициент рекомбинации атомов О и молекул СО на поверхности серебра в зависимости от времени воздействия, характеризующий динамику поверхностного катализа. Исследованы способы имитации радиации Солнца в области вакуумного ультрафиолета и выяснены возможности использования плазмы непрерывного оптического разряда (НОР) для имитации воздействия солнечного излучения во всех спектральных диапазонах начиная от ВУФ до ИК.

На рис. 4 проведено сравнение спектральной яркости плазмы НОР, полученной с лазером  $1,07 \text{ мкм}$  в Хе  $p \approx 15 \text{ бар}$ , с данными для наиболее яркой части дуги – катодной области стандартной короткодуговой ксеноновой лампы высокого давления (до 20 бар). Данные для НОР с лазером  $1,07 \text{ мкм}$  получены путем сравнения непосредственно измеренной яркости с яркостью эталонного источника. Данные для ксеноновой дуговой лампы на токе  $I = 5 \text{ А}$  получены аналогично, теми же приборами и в тех же условиях. Видно, что при достаточном превышении

плазмы дугового разряда и приближается к яркости черного тела при температуре 5,8 кК, и даже превышает ее в области оптически плотных участков спектральных линий, а также в ультрафиолетовом диапазоне, что говорит о высокой температуре плазмы. На основании приведенных данных можно сделать вывод о том, что на основе НОР может быть создан имитатор излучения Солнца, способный создавать эквивалентный или больший поток излучения в диапазоне от 100 нм до ИК с преобладанием в спектре ВУФ составляющей. Увеличенный поток излучения плазмы НОР в коротковолновом ультрафиолетовом диапазоне, возникающий благодаря высокой максимальной температуре аргоновой плазмы (более 17 кК) при атмосферном давлении, благоприятен для проведения ускоренных испытаний на воздействие ВУФ-излучения, а также допускает использование в конструкции испытательного стенда частично прозрачных в этой области спектра материалов для ввода излучения из заполненной газом камеры НОР в высоковакуумную камеру имитатора космического пространства при приемлемом уровне потерь.

Выполнены экспериментальные исследования теплоотдачи в дискретно-шероховатом канале с относительным шагом выступов 10 при близком к гармоническому закону изменения скорости теплоносителя  $u=U+A_u \sin(2\pi f t)$ , где  $U$  – средняя скорость,  $A_u$  – амплитуда пульсаций,  $f$  – частота пульсаций,  $t$  – время (Михеев Н.И., ИЦПЭ КазНЦ РАН, Казань). При обобщении экспериментальных данных использовались числа Нуссельта, Рейнольдса и два числа подобия, характеризующие нестационарность потока: относительная амплитуда пульсаций  $\beta = A_u/U$  и относительная частота (число Струхалия) наложенных пульсаций  $Sh = f X_R^{ct} / U$ , в котором в качестве характерной длины использовано расстояние до средней точки присоединения потока за выступом в стационарных условиях  $X_R^{ct}$ . Эти числа подобия в экспериментах изменялись в широком диапазоне  $\beta = 0 \dots 3$  и  $Sh = 0 \dots 4$ . По результатам опытов оценивался коэффициент дополнительной интенсификации теплообмена от влияния нестационарности потока. Он представлял собой отношение числа Нуссельта в условиях нестационарности потока  $Nu$  к опытному значению  $Nu_{ct}$  в том же самом дискретно-шероховатом канале при стационарном потоке с таким же числом Рейнольдса.



*Эффект дополнительной интенсификации теплообмена в ДШК в зависимости от параметров нестационарности потока*

при числе подобия  $>0,1$  выявлен эффект дополнительной интенсификации теплообмена за счет нестационарности потока, в области высоких значений этого безразмерного комплекса достигающий более чем 1,5-кратного уровня по отношению к стационарным режимам при том же расходе теплоносителя. Обнаруженный эффект открывает новые возможности повышения эффективности систем охлаждения теплонапряженных элементов летательных аппаратов.

Анализ экспериментальных данных показал, что  $Sh$  и  $\beta$  влияют на  $Nu/Nu_{ct}$ . Экспериментальные данные по дополнительной интенсификации теплообмена хорошо обобщаются зависимостью от нового числа подобия  $\frac{A_u f}{U^2 / X_R^{но}}$ ,

имеющего физический смысл относительного ускорения пульсирующего потока. Обобщенные данные по дополнительному нестационарному эффекту интенсификации теплообмена в дискретно-шероховатом канале с относительным шагом выступов 10 представлены на рисунке. Как видно из рисунка, при числе

По плану работ текущего года получены новые результаты при осаждении углеродных пленок (Ребров А.К., ИТ им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск). Важным достижением является создание реактора с вольфрамовой спиралью, обеспечивающего активацию при температурах 2000 – 2200<sup>0</sup>С. При температуре спирали 2100<sup>0</sup>С, температуре подложки 800<sup>0</sup>С из потока активированной смеси водорода (99%) с метаном (1%) синтезированы алмазоподобные и алмазные пленки. При давлении в камере осаждения 20 мм рт.ст. по данным сканирующей электронной микроскопии пленки представляют собой алмазные тетрагональные структуры и пучки призм гексагонального сечения длиной порядка 1 мкм с характерным размером поперечного сечения 50 – 100 нм (рис.5).

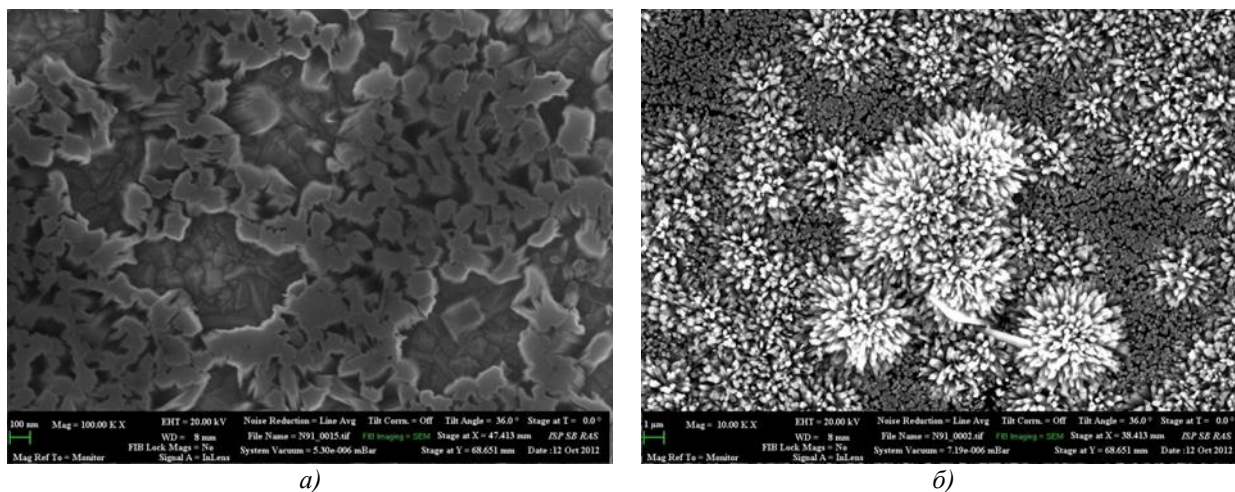


Рис. 5 Морфология пленки со сканирующего электронного микроскопа LEO-420 фирмы Carl Zeiss: а) алмазные тетрагональные структуры, б) пучки призм гексагонального сечения

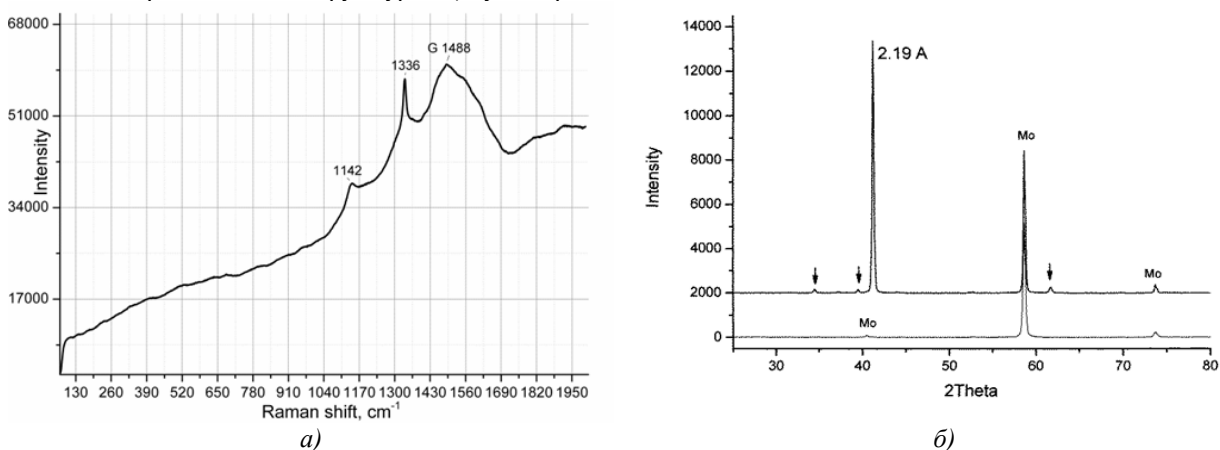


Рис. 6 а) Спектр КРС пленки, полученный на спектрометре LabRAM HR800 (HORIBA Jobin Yvon); б) Спектр рентгеновской дифракции, полученный на рентгеновском дифрактометре Bruker D8

Спектр комбинационного рассеяния света с ультрафиолетовым возбуждением обнаруживает алмазный пик на частоте 1336 см<sup>-1</sup>, на спектре при возбуждении видимым излучением (рис. 6а), кроме алмазного пика на частоте 1337 см<sup>-1</sup> четко обозначается «мягкий» пик 1143 см<sup>-1</sup>, который может быть объяснен присутствием лонсдейлита. Спектр рентгеновской дифракции (рис. 6б) обнаруживает 2 пика: очень четкий пик под углом 42<sup>0</sup> (принадлежит лонсдейлиту), второй пик под углом 58<sup>0</sup> принадлежит молибдену от подложки. Из спектра рентгеновской дифракции следует, что гексагональные призмы не могут принадлежать кристаллам графита. Авторам неизвестно получение гексагональных структур в углеродных пленках. Авторам также неизвестны случаи синтеза лонсдейлита при низком давлении в лабораторных условиях. Этот минерал встречается в кратерах от метеоритов. В лабораториях получают композит алмаз – лонсдейлит при давлениях 2-15 ГПа и температурах 1100-1600К.

В рамках полных уравнений Навье-Стокса и химически неравновесной модели газовой среды выполнено численное исследование процессов и течений в разрядных каналах индукционных ВЧ-плазмотронов со звуковым (ВГУ-4, ИПМех РАН) и сверхзвуковым (АДТ ВАТ-104, ЦАГИ) соплами (Сахаров В.И., Левин В.А., НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва).

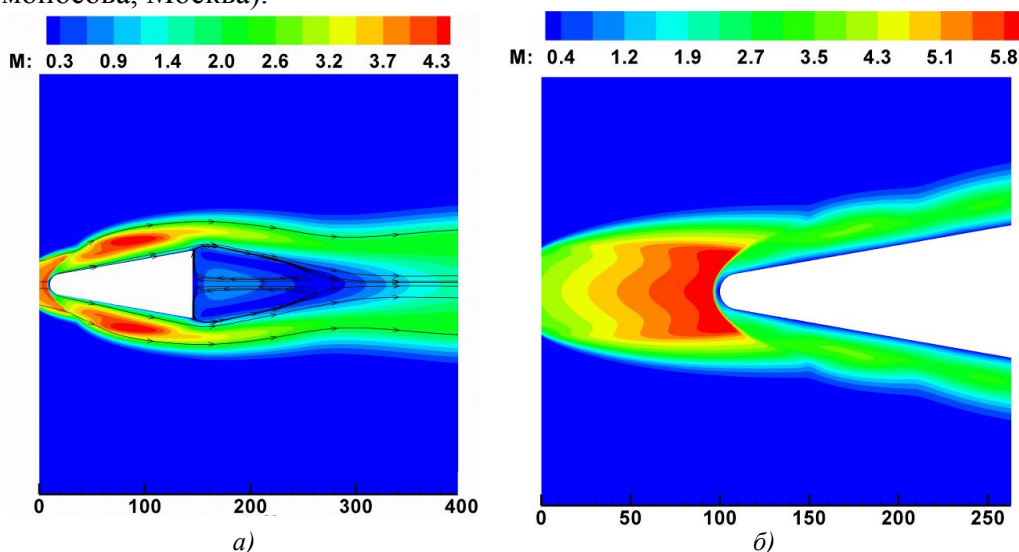


Рис. 7 Изолинии чисел Маха при обтекании недорасширенной струей воздуха из подогревателя АДТ ВАТ-104 сферически затупленного конуса, расположенного на различных расстояниях от среза сопла: а) 10 мм, б) 100 мм

Изучена ударно-волновая структура истекающих недорасширенных воздушных струй и обтекание ими цилиндрических моделей с плоским торцом и сферически затупленного конуса для различных условий в экспериментах (Рис. 7). Обнаружен эффект формирования за донным срезом тела области интенсивного возвратно-циркуляционного течения, размеры которой значительно превышают размеры зоны, возникающей при обтекании тела равномерным потоком. В отличие от гиперзвукового обтекания тел в атмосфере или в аэродинамических трубах, при обтекании конуса недорасширенной струей, диаметр которой сравним или меньше миделевого сечения тела, в донной области формируется возвратно-циркуляционная зона, размеры которой и относительные значения параметров в ней (температура, давление) достигают больших значений (Рис. 7а).

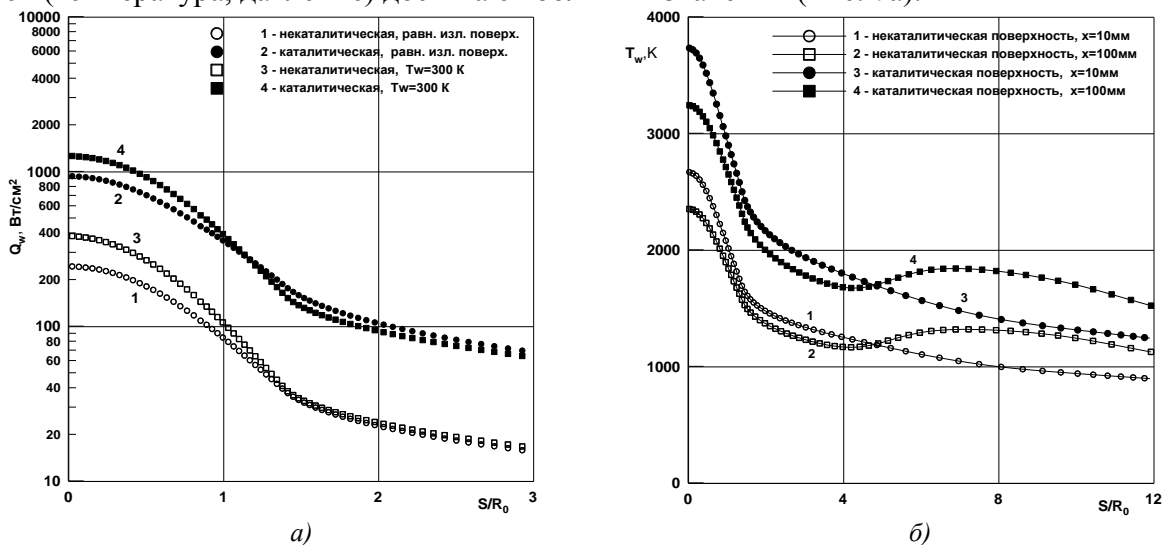


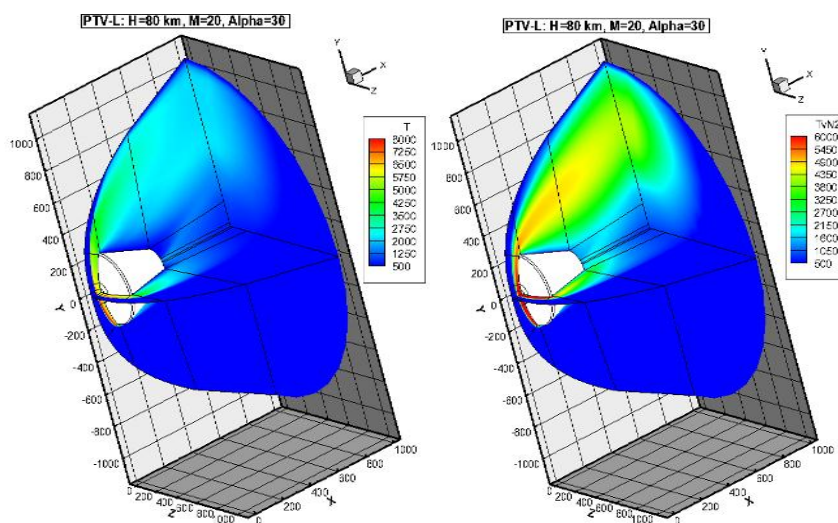
Рис. 8 Распределения тепловых потоков (а) и равновесной радиационной температуры (б) вдоль поверхности конуса.



Область отрыва в этом случае даже несколько «всплывает» над донным срезом, что препятствует поступлению газа из недорасширенной струи в донную область. Размеры отрывной зоны за телом, обтекаемым бесконечным сверхзвуковым потоком, будут существенно меньше при тех же значениях чисел Рейнольдса, которые реализуются в недорасширенной струе, истекающей из подогревателя установки. Исследован теплообмен недорасширенных воздушных струй с моделями, установленными в рабочих частях установок. Показано, что использование некаталитического покрытия поверхности моделей позволяет существенно (до 4-х раз) снизить теплообмен с поверхностью по сравнению с высококatalитическим за счет уменьшения диффузионной составляющей теплового потока (Рис. 8а). Равновесная радиационная температура поверхности конуса для идеально каталитической поверхности также существенно больше, чем для некаталитической (Рис. 8б).

Дана формулировка и обоснование совместности системы уравнений механики сплошной среды, кинетики радиационно-столкновительных процессов возбуждения внутренних степеней свободы атомов и молекул, и переноса селективного теплового излучения применительно к проблемам аэрофизики спускаемых космических аппаратов и метеороидов (Суржиков С.Т., ИПМех РАН). Показано, что в условиях отсутствия термического равновесия по

внутренним степеням свободы преимущество имеют частично консервативные схемы численного моделирования, обеспечивающие корректное выполнение законов сохранения в отдельных энергетических модах (поступательная, электронная, колебательная степени свободы). С использованием сформулированных уравнений дан численный анализ влияния степени термической неравновесности в сильных ударных волнах у поверхности крупномасштабных космических аппаратов на излучательные характеристики сжатых слоев. Выполнены расчеты радиационной аэротермодинамики разрабатываемых в России крупномасштабных спускаемых космических аппаратов нового поколения (пример приведен на рисунке). Выполнено систематическое исследование данных летного эксперимента Fire-II. Расчеты выполнены в осесимметричной постановке обтекания космического аппарата Fire-II, что соответствует реальным экспериментальным условиям. Получено хорошее совпадение с летными данными при учете сильного радиационно-конвективного взаимодействия и учета испускания излучения в спектральных линиях атомов и ионов. С использованием разработанных моделей поступательно-колебательно-электронной неравновесности выполнено расчетное восстановление экспериментальных данных Роуза и Старка. Дано объяснение факту систематического занижения расчетных данных по сравнению с экспериментальными данными, остававшееся непонятным более 20-ти лет.



*Поле поступательной и колебательной температуры молекулярного азота при движении перспективного спускаемого аппарата на высоте  $H=80$  км со скоростью  $M=20$  под углом атаки  $30^\circ$ . Результаты трехмерный расчет течения вязкого, теплопроводного, химически и термически неравновесного излучающего газа*

## Направление 2: Фундаментальные проблемы использования магнито-плазменных технологий в перспективной аэрокосмической технике (для управления полетом, снижения сопротивления, управления потоками в трактах двигателей, уменьшения воздействия на окружающую среду и т.п.)

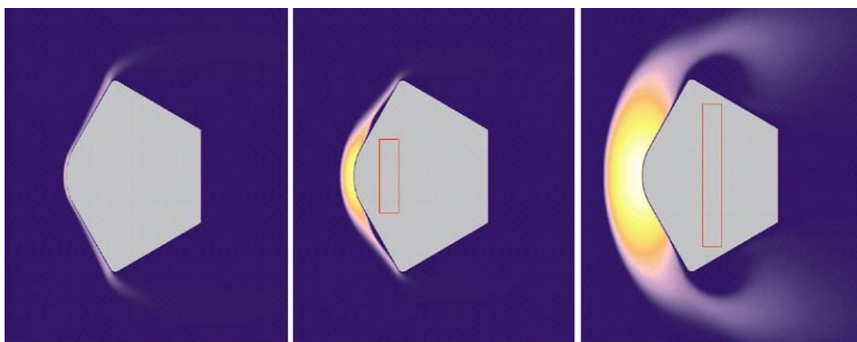
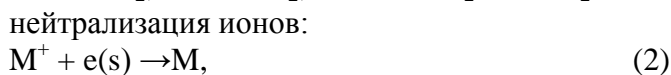
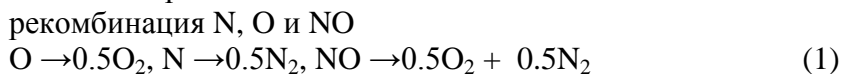


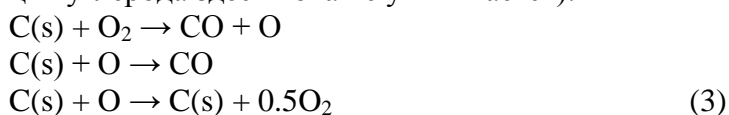
Рис.1 Распределение концентрации электронов в ударном слое капсулы STARDUST без МГД взаимодействия (слева) и с МГД взаимодействием при «малой» (в центре) и «большой» (справа) магнитных системах.

При движении тела в атмосфере Земли (или иных планет) при числах Маха 6 и выше в окрестности передней критической точки кинетическая энергия набегающего потока в значительной части переходит в тепловую, которая затем перераспределяется между поступательными и внутренними степенями свободы, а также на диссоциацию, ионизацию и излучение (Битюрин В.А., Бочаров А.Н., ОИВТ РАН, Москва). Поступательная температура может достигать нескольких десятков тысяч градусов, а тепловые потоки в стенку, соответственно, сотен Мвт/м<sup>2</sup>. Использование «естественной» ионизации за головной ударной волной путем правильно организованного МГД взаимодействия движущейся термической плазмы с магнитным полем позволяет снизить тепловые нагрузки в два-три и более раза. В непосредственной окрестности поверхности тела восстановление равновесного состояния при температуре стенки сопровождается интенсивным тепловыделением, которое увеличивает тепловые потоки в стенку в несколько раз по сравнению со случаем «замороженного» химического состава. Известно, что скорость рекомбинации (и, соответственно, мощность тепловыделения) определяется в значительной степени каталитическими свойствами материала стенки. В аэрокосмических приложениях обычно рассматриваются следующие основные процессы:

рекомбинация N, O и NO  
 $O \rightarrow 0.5O_2, N \rightarrow 0.5N_2, NO \rightarrow 0.5O_2 + 0.5N_2$  (1)  
 нейтрализация ионов:  
 $M^+ + e(s) \rightarrow M,$  (2)  
 где M обозначает любую из компонент воздуха O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NO, O, N, или продуктов разложения стенки как, например, C, CO, Na и др. Для большинства теплозащитных покрытий необходимо учитывать реакции окисления углерода и рекомбинации кислорода (сублимация углерода здесь пока не учитывается):



где M обозначает любую из компонент воздуха O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NO, O, N, или продуктов разложения стенки как, например, C, CO, Na и др. Для большинства теплозащитных покрытий необходимо учитывать реакции окисления углерода и рекомбинации кислорода (сублимация углерода здесь пока не учитывается):



Для оценки верхнего и нижнего уровня плотности тепловых потоков можно рассмотреть два предельных случая: супер-каталитической и некаталитической стенки. Для первого случая «мгновенной» рекомбинации можно использовать простое граничное условие на стенке:  $n_{O_2(s)} = n_{O_2(\infty)}$ ,  $n_{N_2(s)} = n_{N_2(\infty)}$ , (4)

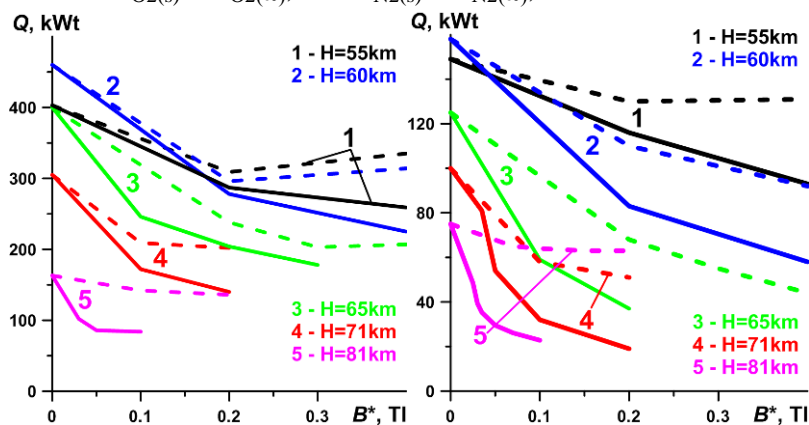


Рис.2 Интегральный приток тепла на капсулу в характерных точках траектории спуска для «супер-каталитических» (слева) и «некаталитических» граничных условий для «большой» (сплошные линии) и «малой» (пунктир) магнитной систем.

Во втором случае «некаталитической» стенки можно потребовать нулевых диффузионных потоков по всем компонентам. Для иллюстрации относительного влияния двух обсуждаемых процессов был рассмотрен реальный случай изменения параметров вдоль траектории спуска капсулы STARDUST. В расчетах температура поверхности принималась равной  $T_w=1800K$ . Численная модель разрабо-

тана нами ранее и базируется на согласованном решении уравнений Навье-Стокса, химической кинетики и, при необходимости, уравнений Максвелла в МГД приближении. На рис.2 представлены распределения концентрации электронов для трех случаев: без МГД и с МГД взаимодействием (для двух различных конфигураций магнитной системы). Отметим, что в результате МГД взаимодействия, структура обтекания изменяется кардинальным образом. Интегральный тепловой приток к спускаемому аппарату также изменяется существенно (и в желаемом направлении) для обоих случаев граничных условий. Важно отметить, что масштаб воздействия каталитических свойств поверхности никогда не превышает возможности снижения тепловых нагрузок (как локальных, так и интегральных) за счет применения МГД управления обтеканием.

Создана малогабаритная газодинамическая установка, позволяющая создавать сверхзвуковой поток слабоионизованной плазмы (рис. 3) (Бобашев С.В., ФТИ им. Иоффе РАН, Санкт-Петербург). Основным элементом установки, является сверхзвуковое сопло (1) и электромагнитное устройство, состоящее из магнитной катушки (2), кольцевого электрода (3) и центрального электрода (5). Выходной диаметр сопла составляет 60 мм, а число Маха сверхзвукового потока воздуха  $M = 5.5$ . Оптическая диагностика плазменных образований осуществляется с помощью высокоскоростной 3-канальной цифровой фотокамеры HSFC-Pro с минимальной выдержкой  $10^{-6}$  с. Запуск электромагнитного устройства происходит в момент разрыва диафрагмы и формирования сверхзвукового потока воздуха. Между кольцевым электродом (3) и центральным электродом (1) зажигается газовый разряд (4), который начинает вращаться в соленоидальном магнитном поле под действием пондеромоторной силы. Длительность импульса тока протекающего через разряд составляет  $\sim 1$  мс. Проведена серия экспериментов, как в условиях неподвижного газа, так и при сверхзвуковом течении воздуха в сопле. Установлено, что при уменьшении давления окружающего газа наблюдается более равномерное распределение свечения разряда в области взаимодействия, а при увеличении тока разряда увеличивается число катодных пятен на кольцевом электроде. Распределение катодных пятен на поверхности кольцевого электрода достаточно равномерное – пятна располагаются симметрично относительно оси сопла. Свечение разряда в пространстве между электродами довольно однородно, что свидетельствует о равномерном распределении тока в азимутальном направлении. Уста-

новлено, что динамика газового разряда существенным образом зависит от полярности подключения кольцевого и центрального электродов и как следствие от приэлектродных процессов. В случае, когда кольцевой электрод является катодом, структура и поведение разряда определяется интерференцией двух основных процессов: действием пондеромоторной силы и динамикой катодного пятна.

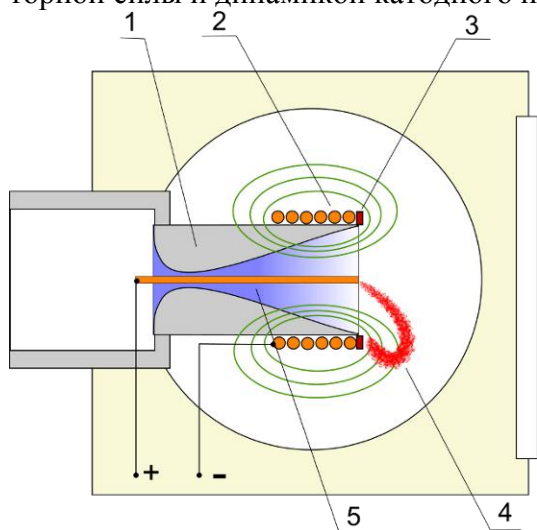


Рис. 3. Конструкция устройства: 1 – сверхзвуковое сопло, 2 – магнитная катушка, 3 – кольцевой электрод, 4 – электрический разряд, 5 – центральный электрод.

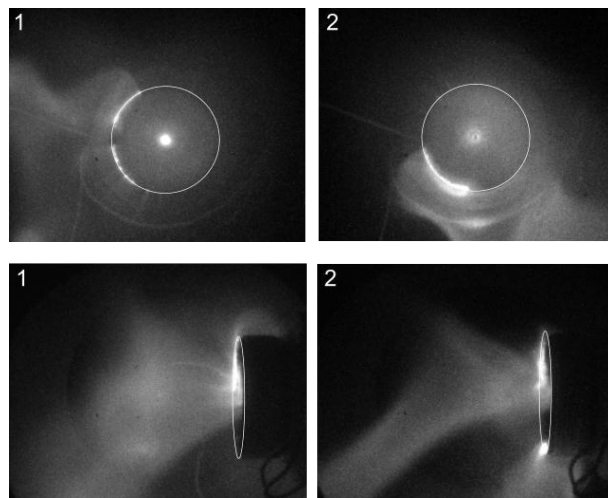


Рис. 4. Скоростная фотосъемка разряда в сверхзвуковом потоке воздуха  $M = 5.5$ , интервал между кадрами 50 мкс. Верхние фотографии – вид со стороны сопла, нижние фотографии – вид сбоку.

Экспериментально исследован процесс формирования концевой вихря за кромкой модели крыла при инициировании искрового разряда вблизи торца крыла (Голуб В.В., ОИВТ РАН, Москва). Для экспериментов был выбран профиль крыла NACA0015 с хордой 80 мм и размахом 85 мм, выполненный из оргстекла. Вблизи одного из торцов заподлицо встроен разрядник (т.н. плазменный актуатор) для создания искрового разряда длиной 0.5 см. К электродам разрядника прикладывалось импульсное высокое напряжение для инициирования разряда.

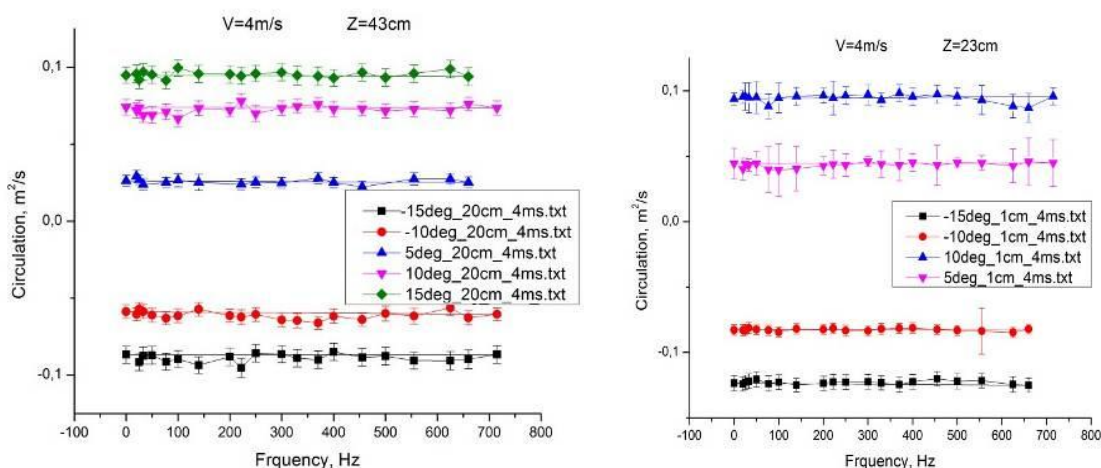


Рис.5 Зависимость циркуляции в области концевой вихря от частоты инициирования разряда. Прямые линии – случай без инициирования разряда.

Модель с разрядником помещалась в аэродинамическую трубу (скорость воздуха 0-20 м/с) сечением  $10 \times 10 \text{ см}^2$ , причем ее конструкция позволяла изменять угол атаки к набегающему потоку воздуха  $-10^\circ - +10^\circ$ . В качестве диагностики вихревого следа (концевого вихря) применялась система Stereo Particle Image Velocimetry (Stereo PIV), размер ядра

вихря и завихренность в ядре измерялись с помощью данной системы. Эксперимент показал влияние присутствия разряда на величину завихренности в ядре концевой вихря. В общем, этот эффект может быть выражен в терминах циркуляции скорости по контуру ядра вихря или (по теореме Стокса) в терминах интеграла завихренности по поверхности, ограниченной контуром ядра вихря. На рис. 5 представлены результаты измерений и обработки полей скоростей (компоненты скорости в плоскости, перпендикулярной направлению движения основного потока воздуха). Расстояние от задней кромки профиля до плоскости измерения 1 см и 20 см, скорость набегающего потока 4 м/с. На представленном рисунке видно, что завихренность в ядре вихря меньше в случае инициирования разряда. Из экспериментов видно, что циркуляция по модулю уменьшается в случае, когда частота следования разряда имеет определенную величину, то есть исследуемое явление имеет резонансный характер.

Для получения высокоскоростных потоков плотной плазмы введен в строй электромагнитный рельсовый ускоритель с каналами  $4 \times 4 \text{ мм}^2$ ,  $6 \times 6 \text{ мм}^2$ ,  $9 \times 9 \text{ мм}^2$  с графитовыми или медными электродами (Жуков Б.Г., ФТИ им. Иоффе РАН, Санкт-Петербург). Химсостав плазмы определяется материалом поверхности электродов (рельс). В эксперименте регистрируются скорости плазменных потоков к концу разгона в диапазоне 2-17 км/с. Проведены эксперименты по взаимодействию потоков углеродной плазмы с различными мишенями. Проведен расчет равновесного состава и эффективного показателя адиабаты низкотемпературной углеродной плазмы, содержащей нейтральные и заряженные кластеры углерода вплоть до кластеров  $C_{15}$ . Определен диапазон температур и давлений, при которых происходит ассоциация атомов углерода в многоатомные кластеры. Показано, что эффективный показатель адиабаты углеродной плазмы (рис.6) является сложной немонотонной функцией температуры, что существенно влияет на истечение струи углеродной плазмы и обтекание различных препятствий плазменными потоками. Отмечено, что близость показателя адиабаты  $\gamma$  к 1 служит доказательством присутствия в потоке многоатомных молекул (кластеров). На рис. 7 представлена фотография сверхзвукового потока плазмы, истекающей из сопла и обтекающей помещенный в поток клин. Хорошо видны детали, в частности, угол наклона косога скачка, значение которого может быть использовано для определения эффективного показателя адиабаты. Проведен самосогласованный расчет стационарной задачи о радиально симметричном адиабатическом расширении низкотемпературной углеродной плазмы.

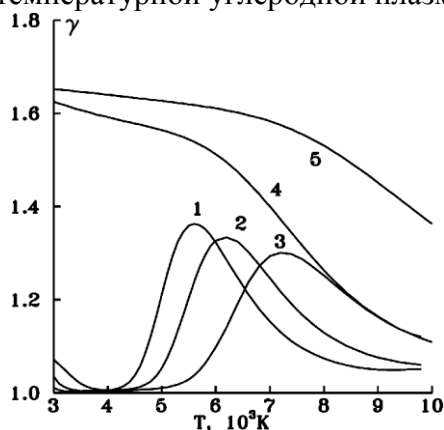


Рис.6. Зависимость показателя адиабаты углеродной плазмы  $\gamma = C_p / C_v$  от температуры.  $P$ , бар: 1—0.02, 2—0.1, 3—1. Кривые 4, 5 - расчет без учета кластеризации.

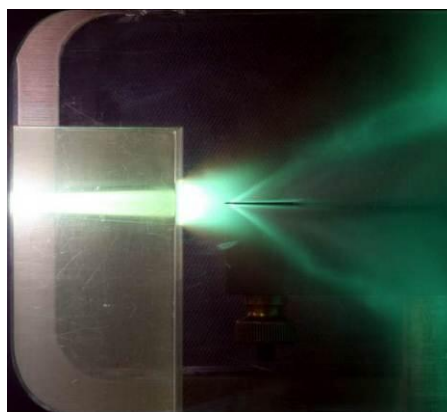


Рис.7 Обтекание пластинки потоком плотной углеродной плазмы, истекающей из сопла, расположенного за дульным срезом ускорителя.

В 2012 г в ИОФ РАН разработаны фундаментальные принципы трансформации многомерных (тороидальных) ударных волн, создаваемых кольцевым источником газоразрядной плазмы, в одномерные (сферические, квазисферические) ударные волны, кумулятивно сходящиеся к центру сферы вблизи плоских твёрдых преград, а также в свободном пространстве (Косый И.А., ИОФ РАН, Москва). Возможности реализации разработанных принципов подтверждены лабораторным экспериментом. Продемонстрирован также переход квазисферической ударной волны, формируемой вблизи плоской преграды, в детонационную волну при работе кольцевого электроразрядного источника в горючей газовой среде. Схема эксперимента, проведённого в горючей газовой смеси ( $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{O}_2$ ), приведена на рис. 8. Электроразрядное кольцо (3) генерирует тороидальную ударную волну, сходящуюся к центру кольца, распространяющуюся после фокусировки вдоль оси  $Z$ , взаимодействующую с плоскими преградами (2), являющимися смотровыми кварцевыми окнами, и формирующую квазисферическую ударную волну у преграды при отражении от неё. (1-металлическая камера, 4, 5, 6 – диагностическая аппаратура). На рис. 9 приведена характерная скоростная фотография свечения волны горения (воспламенения), переходящей в детонационную волну вблизи плоской преграды (окна камеры). Области возможного приложения: приосевая инициация воспламенения скоростных топливно-воздушных потоков, усиленное ударноволновое воздействие на находящиеся в газовой среде твёрдые преграды и др.

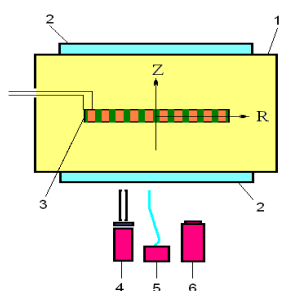


Рис. 8

характерная скоростная фотография свечения волны горения (воспламенения), переходящей в детонационную волну вблизи плоской преграды (окна камеры). Области возможного приложения: приосевая инициация воспламенения скоростных топливно-воздушных потоков, усиленное ударноволновое воздействие на находящиеся в газовой среде твёрдые преграды и др.

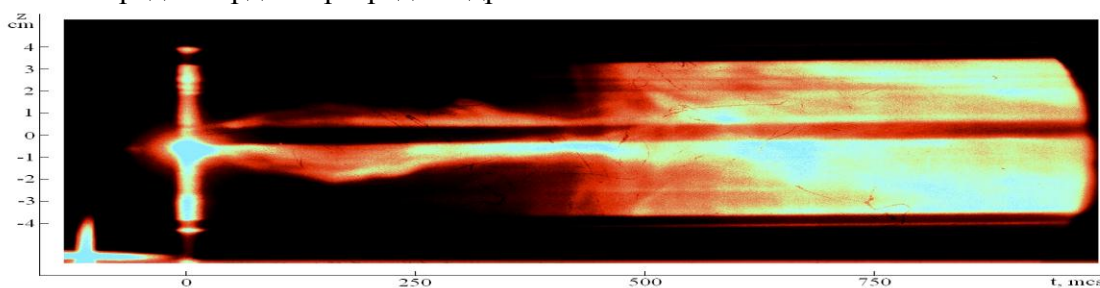


Рис. 9

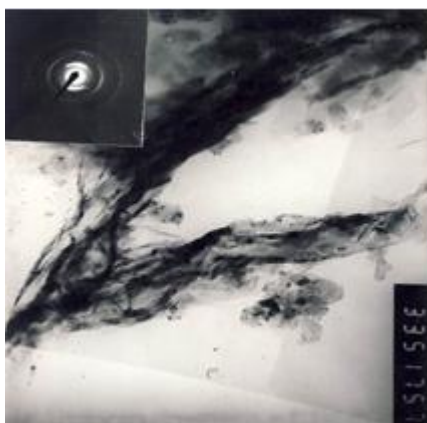


Рис. 10. Электронно микроскопическое изображение нанотрубки. JEM-100CX.

Впервые показана возможность получения углерод-углеродных композиционных материалов при плазменно-стимулированного разложения углеводородов, если в качестве плазмы используется углеродная плазма вакуумно-дугового разряда с графитового катода (Кузнецов В.Г., ИПМаш РАН, Санкт-Петербург). Электронно-микроскопические исследования конденсата позволили установить, что материал представляет собой смесь нанотрубок, графита и пироуглерода. На рис. 10 представлена фотография микроструктуры нанотрубок ( $\times 90000$ ), полученная на просвечивающем электронном микроскопе JEM-100CX, и соответствующая им дифракционная электронограмма, снятая с нескольких нанотрубок, поэтому кольцо (002) представлено в виде дужек. Отсюда межслоевое расстояние нанотрубок  $d_{002} = 0,3354$  нм, что соответствует кристаллическому графиту. Диаметр нанотрубок находился в пределах от 10 нм до 100 нм. Кроме того, на рис. 10 помимо нанотрубок видны отдельные полиэдрические частицы размером 70 нм и меньше.

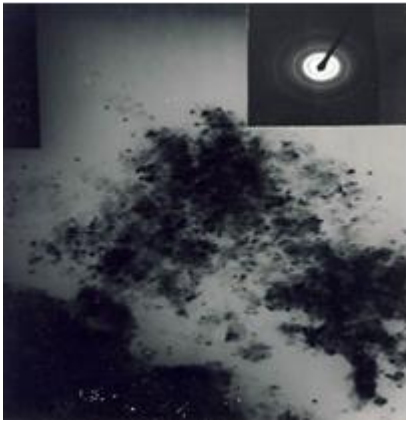


Рис. 11. Фотография микро-структуры полиэдрических частиц. JEM-100СХ.

Уникальная способность данного композиционного материала обнаружена при фильтрации им растворенных в дистиллированной воде радионуклидов. Исследования фильтрационной способности радионуклидов из воды, выполненные в ФГУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены им. П.В. Рамзаева», показали, например, что радионуклид  $^{131}\text{I}$  удаляется из нее практически полностью.

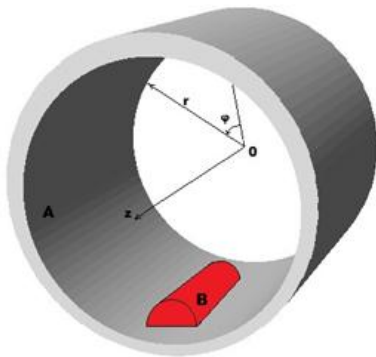


Рис. 13 Схема расчетной области: А - катод, В – анод.

Разработана математическая модель и создана компьютерная программа для расчета и оптимизации температуры цилиндрической поверхности, нагреваемой катодными пятнами вакуумной дуги с подвижной зоной нагрева. Подвижная зона нагрева обеспечивалась вращением анода В (рис. 13) вдоль поверхности катода А. Перед решением поставленной задачи на компьютере в таблицу вносятся исходные данные. При запуске программы в режиме реального времени происходит отображение поля температур на всех поверхностях цилиндрического изделия в виде изолиний различного цвета. По цвету можно судить о температуре. Для любого количества точек с заданными координатами, заранее выбранных на поверхности цилиндра (внутри и снаружи), значения температур от времени записываются в отдельный файл. Экспериментальные и расчетные данные отличаются не более чем на 10%.

Ранее было выполнено численное исследование эффекта формирования отрывных зон перед телом при взаимодействии головной ударной волны с тонким температурным следом за областью энерговыклада, расположенной в сверхзвуковом набегающем потоке (Левин В.А., Георгиевский П.Ю., НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва). Было показано, что сверхмалые области энерговыклада могут быть использованы для формирования передних отрывных зон, что позволяет существенно (до 30%) снизить волновое сопротивление тел при малых энергозатратах (когда мощность энергоисточника в

На рис. 11 представлена фотография микро-структуры полиэдрических микродисперсных частиц ( $\times 90000$ ) и соответствующая им микродифракционная электронограмма. Межслоевое расстояние полиэдрических частиц  $d_{002}=0,344-0,346$  нм. Диаметр частиц лежит в пределах от 10 до 40 нм. На рис. 12. представлена фотография структуры частицы ( $\times 18000$ ) и микродифракционная электронограмма, снятая с более светлой частицы в середине фото. Материал представляет собой частицы и агрегаты частиц диаметром от 0,1 мкм до 2,0 мкм. Межслоевое расстояние у снятой частицы  $d_{002}=0,346$  нм, что может соответствовать структуре пироуглерода, обнаруженного и на сканирующем электронном микроскопе.

Уникальная способность

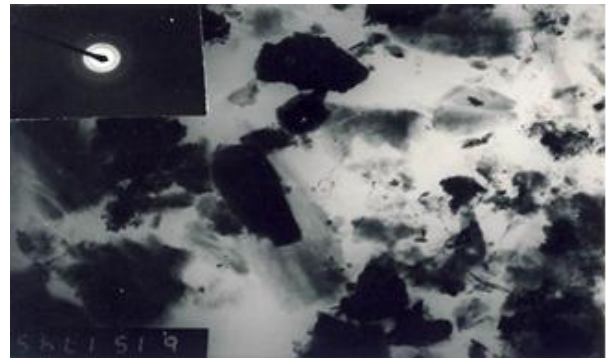


Рис. 12. Электронно-микроскопическое изображение пироуглерода. JEM-100СХ.

о температуре. Для любого количества точек с заданными координатами, заранее выбранных на поверхности цилиндра (внутри и снаружи), значения температур от времени записываются в отдельный файл. Экспериментальные и расчетные данные отличаются не более чем на 10%.

сотни раз меньше сэкономленной мощности). Однако было установлено, что при взаимодействии тонкого температурного следа с ударным слоем развиваются неустойчивости различного типа, что приводит к нежелательным пульсациям течения. В 2012 году было выполнено численное исследование режимов формирования передних отрывных зон при сверхзвуковом обтекании затупленных тел в условиях стационарного и импульсно-периодического энерговклада, организованного в локальных областях набегающего потока. Предложены способы демпфирования различных неустойчивостей передних отрывных зон, наблюдавшихся ранее в расчетах для областей энерговклада сверхмалого размера.

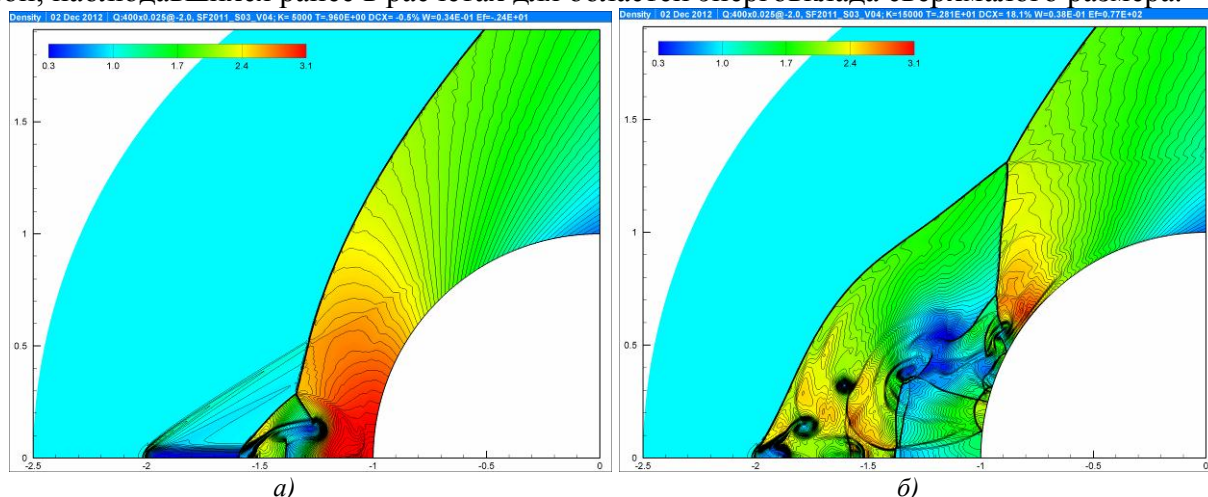


Рис. 14 Срыв формирования передней отрывной зоны и развитие пульсационной неустойчивости расходного типа для стационарного источника малого размера (показаны изолинии плотности для начальной и развитой стадии течения).

Показано, что пульсации расходного типа развиваются при взаимодействии тонкого температурного следа с головной ударной волной (Рис. 14). Пульсации обусловлены разворотом внутрь отрывной зоны высоконапорной струи, которая возникает при взаимодействии ударной волны с тангенциальным разрывом. Установлено, что динамическое изменение размеров области энерговклада от умеренных к сверхмалым позволяет избежать захвата высоконапорной струи областью отрыва (Рис. 15). Недостатком этого метода является необходимость использования на начальном этапе сверхмощных энергоисточников.

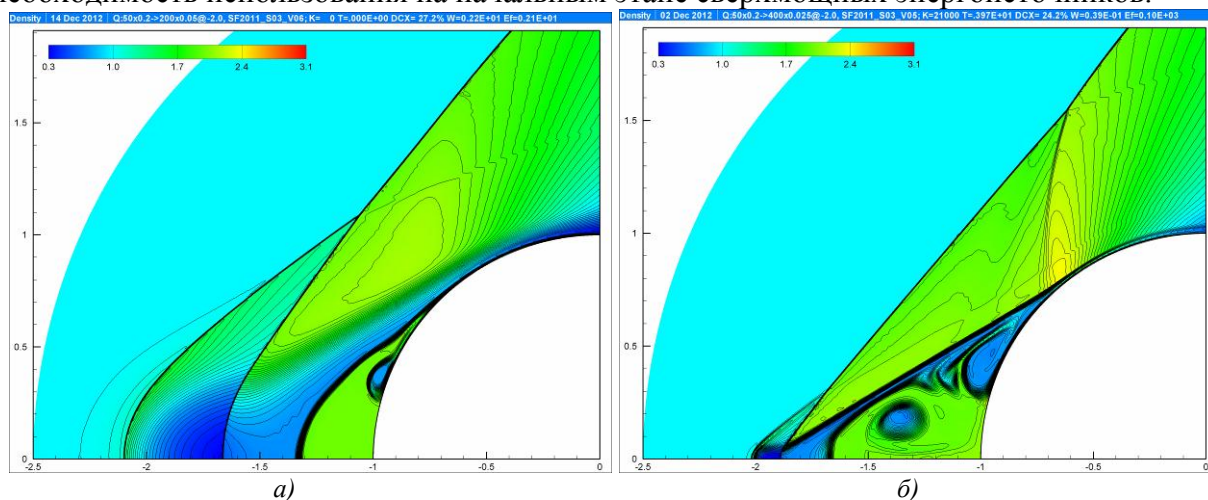


Рис. 15 Формирование квазистационарной изобарической отрывной застойной зоны при динамическом уменьшении размеров области энерговклада (показаны изолинии плотности для начальной и развитой стадии течения).



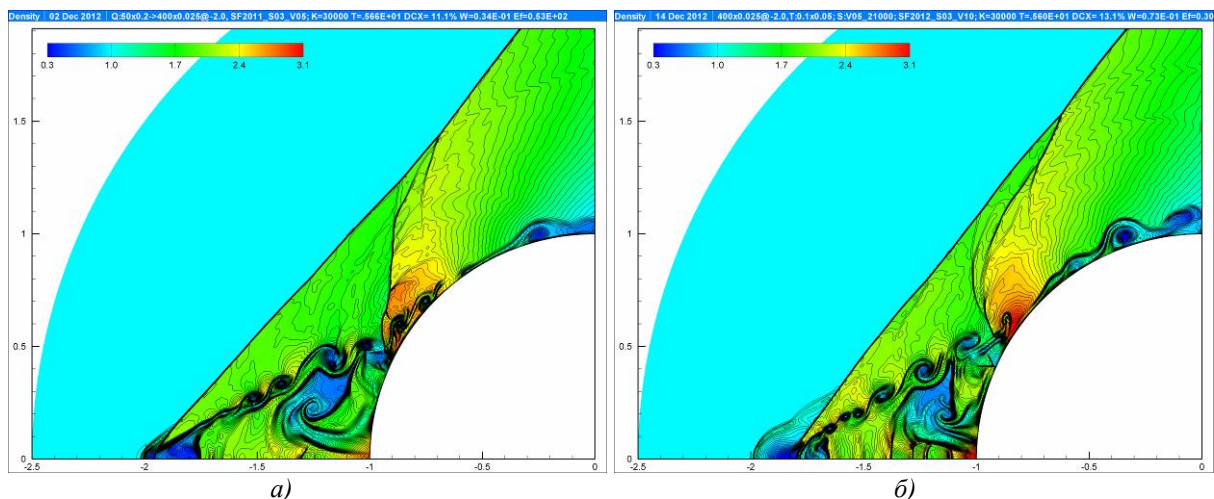


Рис. 16 Развитие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца на границе изобарической отрывной зоны (а) и попытка дробления вихрей при переходе к импульсно-периодическому режиму энергоклада (б) (показаны изолинии плотности).

К неустойчивости другого типа относится классическая неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, развивающаяся в сдвиговом течении на границе отрывной зоны (Рис. 16). Для демпфирования неустойчивости осуществлен переход к импульсно-периодическим режимам энергоклада. Установлено, что при специальном подпоре частоты следования импульсов удается раздробить крупномасштабные вихри, что приводит к существенному ослаблению амплитуды пульсаций давления в отрывной зоне.

Выполнено численное исследование взаимодействия затупленных тел, движущихся с высокими скоростями, с атмосферными неоднородностями (Левин В.А., Георгиевский П.Ю., НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва). На основании анализа имеющихся публикаций можно сделать вывод, что такие неоднородности могут быть искусственно созданы в атмосфере при помощи современных плазменных технологий или возникнуть естественным образом (например, в результате электрических разрядов в грозových условиях). Предполагалось, что неоднородность в набегающем на тело потоке создается за счет энергоклада в локальной области, который осуществляется в течение малого промежутка времени. В момент включения энергоисточника возникает ударная волна, которая взаимодействует с телом. Затем по мере прогрева частиц газа в области энергоклада формируется облако, температура в центре которого примерно 5 раз превышает температуру невозмущенного потока. Высокотемпературное облако сносится потоком и взаимодействует с отошедшим головным скачком уплотнения и ударным слоем перед телом. Плотность подвода энергии в области энергоклада имеет Гауссовское (нормальное) распределение, достигает максимума в центре и плавно спадает к краям, поэтому высокотемпературное облако не имеет резко очерченных границ. Еще в 1993 году авторами проекта обнаружен новый качественный эффект возникновения anomalно высоких нагрузок на теле за счет кумуляции волн сжатия для неоднородности с резкими границами (типа «ступенька»). Одной из целей настоящего исследования была проверка гипотезы, что anomalные нагрузки возникают и в случае столкновения быстролетящих тел с распределенными неоднородностями. Расчеты проведены для случая обтекания сферы при числе Маха набегающего потока 2, областей энергоклада различного размера и геометрической конфигурации, а также различных длительностей импульса энергоклада. На рис. 17 показаны зависимости волнового сопротивления тела и давления в критической точке тела от времени. Для сферических энергоисточников различного размера в отличие от эллипсоидального энергоисточника, кривые имеют качественное сходство: наблюдается первичный всплеск при взаимодействии с ударной волной, затем «яма» и вторичный всплеск. Чем больше размер энергоисточника, тем больше глубже «яма» по сопротивлению, что вполне

ожидаемо. А вот максимально резкий вторичный всплеск давления в критической точке сферы наблюдается для энергоисточника промежуточного размера.

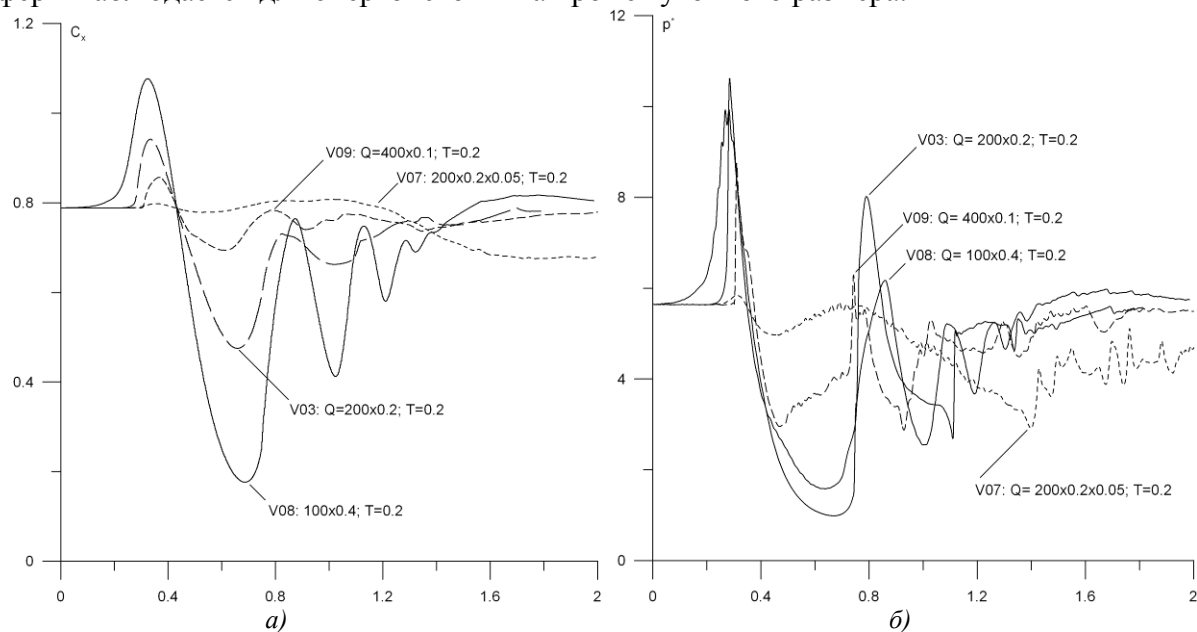


Рис. 17 Зависимость волнового сопротивления тела (а) и давления в критической точке тела (б) от времени для сферических (варианты 03,08,09) и эллипсоидального (вариант 07) энергоисточников и одинаковой длительности импульса.

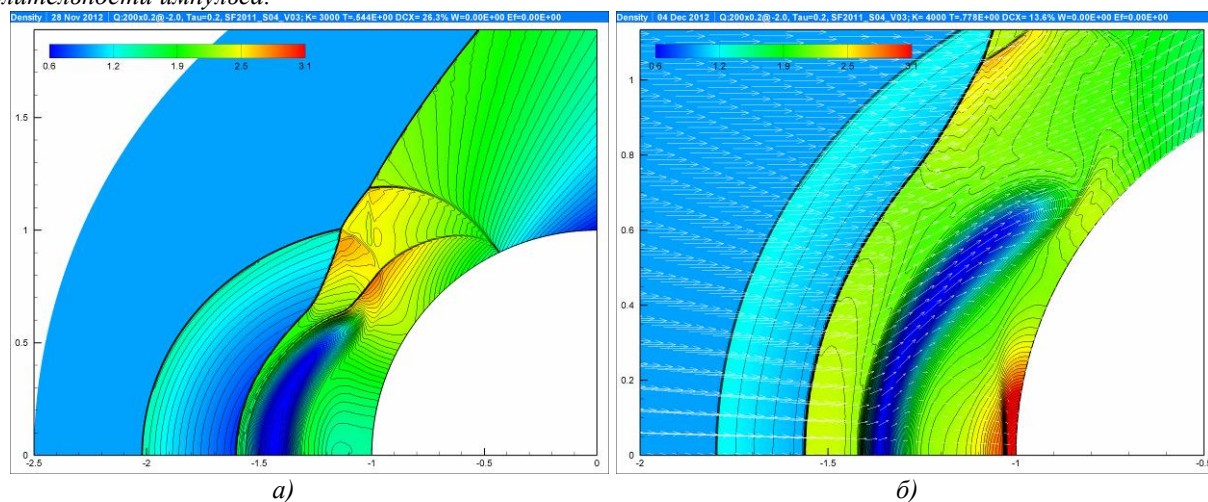


Рис. 18 Поглощение высокотемпературного облака ударным слоем и формирование «линзы» низкой плотности (а); эффект кумуляции волны сжатия в критической точке тела (б) (изолинии плотности).

Для выяснения причины аномального всплеска давления в критической точке, проявляющегося лишь в некоторых случаях, был выполнен анализ динамики взаимодействия высокотемпературного облака с ударным слоем перед телом (Рис. 18). Сначала при взаимодействии высокотемпературного облака с ударным слоем наблюдается отход головной ударной волны, что приводит к уменьшению давления перед лобовой поверхностью тела и к соответствующему снижению сопротивления. После восстановления перед головной ударной волной исходных параметров происходит поглощение облака, формирование характерной «линзы» низкой плотности и волны сжатия, распространяющейся к телу (Рис. 18а). Анализ поля скоростей показывает, что в этот момент возникает радиальное движение газа, направленное к критической точке тела. В результате «опрокидывания» волны сжатия формируется скачок уплотнения и реализуется эффект кумуляции (Рис. 18б), что приводит к аномальному всплеску давления. При этом оказывается, что

существенным фактором является форма «высокотемпературной линзы», которая, в свою очередь, зависит от размеров и формы области энерговклада.

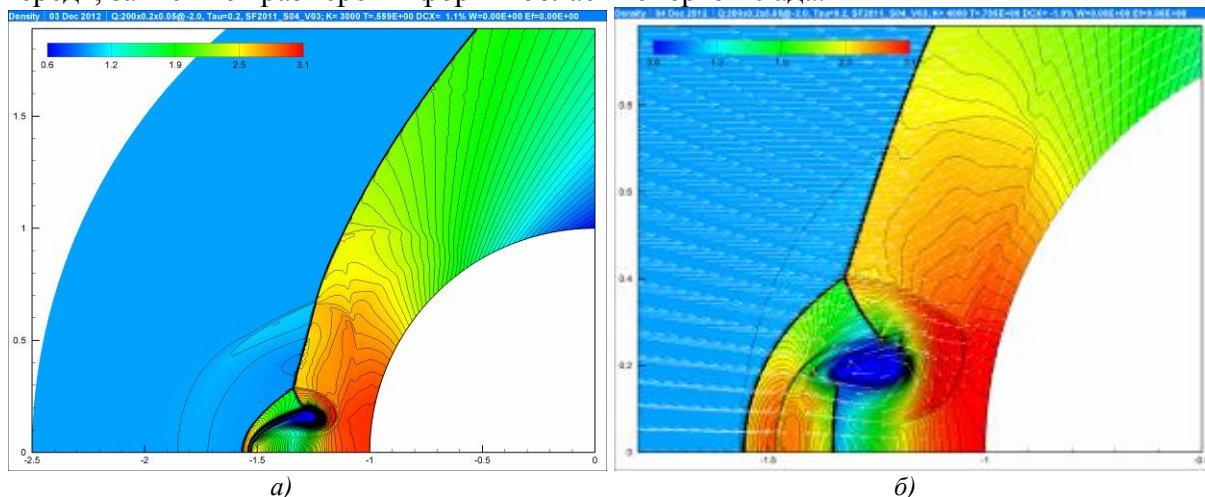


Рис. 19 Перестройка течения с образованием двумерной нестационарной ударно-волновой структуры – предвестника при взаимодействии с облаком от тонкого эллипсоидального энергоисточника (изолинии плотности).

Эффект кумуляции не проявляется для тонкой эллипсоидальной области энерговклада, несмотря на то, что в этом случае наблюдается перестройка течения с образованием двумерной нестационарной ударно-волновой структуры – предвестника (на рис. 19 показаны поля плотности для тех же моментов времени, что и на рис. 18). Высокотемпературное облако при таком взаимодействии, «сворачивается» в тороидальный вихрь, а условий для кумуляции не создается. Напротив, перед лобовой поверхностью тела формируется плотный слой, в котором скорость газа направлена от тела. Таким образом, в результате проведенных исследований в отдельных случаях при взаимодействии высокотемпературного облака с ударным слоем перед затупленным телом зафиксирован эффект возникновения anomalously высоких нагрузок за счет кумуляции волн сжатия в приосевой области. Показано, что интенсивность нагрузок существенно зависит от формы и температуры сформированного облака, но не зависит от степени размазанности границ неоднородности.

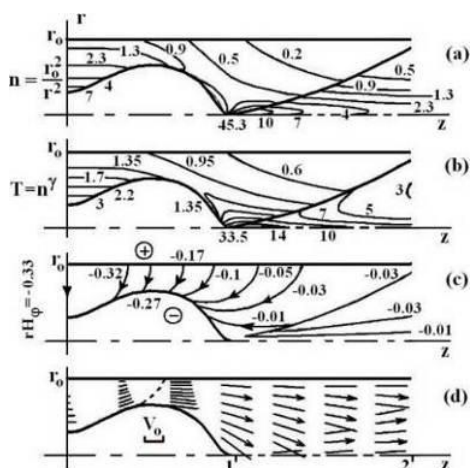


Рис. 20 Компрессионное течение плазмы в КСПУ.

энергии разработана и программно реализована модель неравновесной колебательной кинетики в варианте квазистационарной релаксации. Проведены аэродинамические расчеты по учету вложения энергии для конкретной модели ЛА. Разработана двумерная МГД-модель формирования плазменной конфигурации в магнитном поле ловушки «Галатейя-пояс». Квазиравновесная конфигурация с изолированными от плазмы

Проведено исследование компрессионных течений плазмы на выходе из квазистационарного плазменного ускорителя (КСПУ) (Луцкий А.Е, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва). Показано, что средняя скорость потока, расход, параметры в зоне компрессии сильно зависят от массы ионов плазмы. Проведено исследование переноса излучения в потоках ионизирующегося газа с образованием фронта ионизации в канале КСПУ. Показано, что излучение фронта ионизации играют значительную роль в формировании поля излучения, существенный вклад в плотность энергии излучения и плотность потока энергии излучения водородной плазмы вносит альфа линия Лаймана. Для исследования влияния релаксационных процессов в области вложения

проводниками получена на нестационарной стадии с возрастающим по времени током в проводниках.

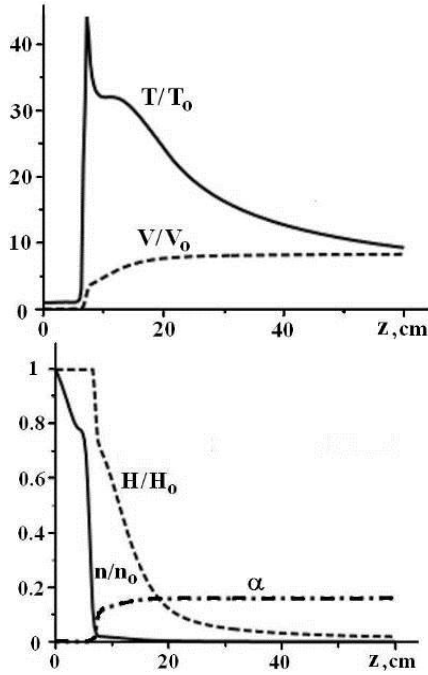


Рис.21 Распределение переменных в потоке ионизирующегося газа вдоль канала в квазиодномерном приближении.

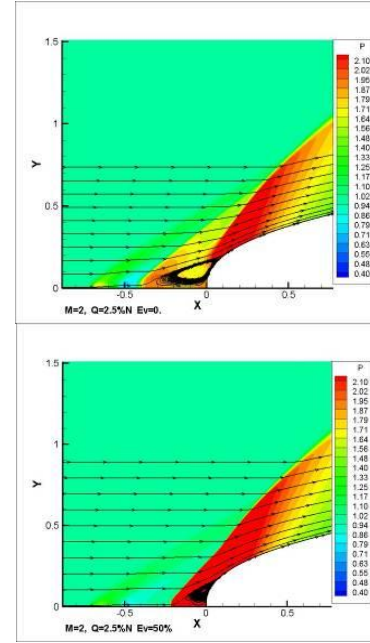


Рис.22 Распределения давления и линии тока для вариантов  $Q/Q_{vibr} = 0$  (сверху) и 50% (снизу).

Анализ литературы по пространственной структуре поверхностных ВЧ разрядов показал, что большая часть работ посвящена временной динамике разряда на протяжении полупериода и исследованию временной зависимости для источника объемной силы в нем (Моралев И.А., ОИВТ РАН, Москва). В то же время, большая часть исследователей игнорирует трехмерную структуру разряда, т.е. распределение источника объемной силы и тепла вдоль электрода. Для того чтобы исследовать возмущения, создаваемые разрядом в пограничном слое, необходимо четко представить себе структуру собственно разряда и иметь возможность управлять его характеристиками. В связи с этим, работа на данном этапе была сосредоточена на исследовании пространственной структуры высокочастотного поверхностного диэлектрического барьерного разряда. Исследования проводились в неподвижном воздухе атмосферного давления, в диапазоне мощности разряда до 100Вт/см длины электрода и в диапазоне частот 70-350кГц.

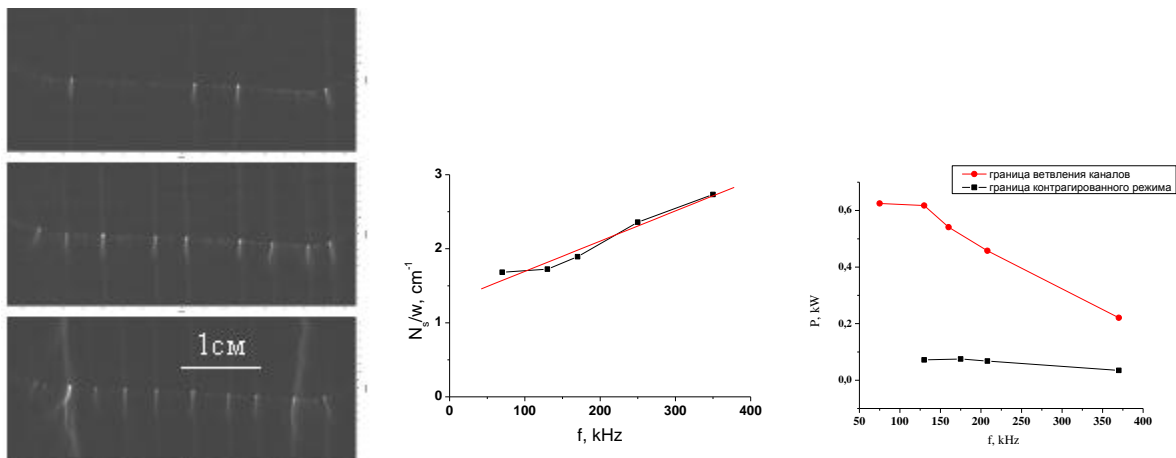


Рис. 23 а) вид разряда при частоте питающего напряжения 350кГц, при увеличении вложенной мощности; б) количество контрагированных микроканалов на единицу длины электрода; в) пределы существования неконтрагированного режима и режима периодической контракции ДБР разряда.

Получено, что в зависимости от подводимой мощности, разряд может существовать в трех режимах: квазиоднородном, периодической контракции и хаотической контракции (рис. 23). В квазиоднородном режиме область горения разряда заполняется мелкомасштабными разрядными каналами, причина образования которых, предположительно – неоднородность пробоя промежутка в положительном полупериоде напряжения (фигуры Лихтенберга). В режиме периодической контракции на фоне квазиоднородного разряда возникают токовые каналы, количество которых растет с увеличением вложенной мощности. Начиная с определенного значения мощности, каналы образуют гребенку с фиксированным шагом вдоль открытого электрода. Длина каналов также слабо меняется вдоль электрода. Время, в течение которого паттерн каналов является неизменным, составляет от сотен микросекунд до сотен миллисекунд. Наконец, при дальнейшем росте мощности происходит ветвление одного или нескольких из разрядных каналов, после чего наступает режим хаотической контракции, когда правильной гребенки микрозарядов на поверхности не наблюдается. Изучена структура разряда в режиме с периодической контракцией. Получены зависимости расстояния между токовыми каналами от частоты питающего напряжения и подводимой мощности, исследована зависимость времени развития контракции разряда от вложенной мощности и частоты питающего напряжения. Время развития контракции в условиях нашего эксперимента составляет от единиц до сотен микросекунд. Основываясь на результатах проведенных исследований, выбраны области электрических параметров питающего напряжения, в которых и будет исследоваться возникновение структур в пограничном слое под действием поверхностного ВЧ разряда.

В работе экспериментально и теоретически исследован процесс формирования отрывного течения сверхзвукового потока воздуха (число Маха  $M=2$ ), обтекающего профиль крыла (двумерный случай), при инициировании искрового разряда на поверхности профиля (Сон Э.Е., ОИВТ РАН, Москва). В работе получены экспериментальная и теоретическая зависимости положения точки отрыва от угла атаки, проведено сравнение.

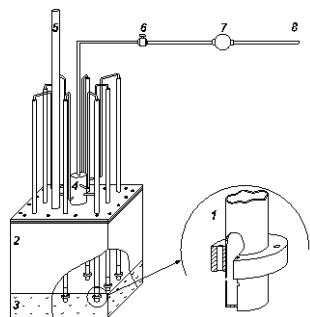


Рис. 24. Генератор масляной аэрозоли. 1 – сопло Ласкина, 2 – корпус генератора, 3 – уровень масла, 4 – газовый коллектор, 5 – выход частиц с воздушным потоком, 6 – электропневмоклапан, 7 – редуктор, 8 – вход воздуха под давлением.

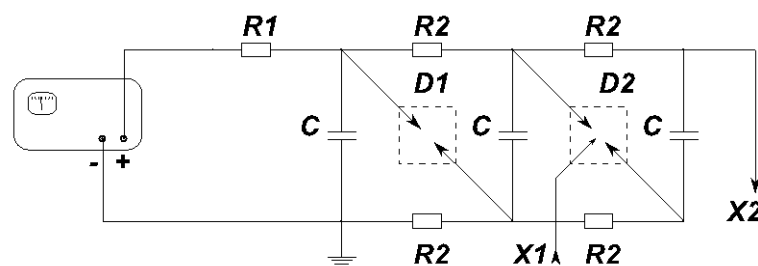


Рис. 25. Электрическая схема генератора высоковольтных импульсов.  $R1=100$  кОм,  $R2=30$  кОм,  $C=4.7$  нФ х 6.3 кВ.

На базе сверхзвуковой аэродинамической трубы СТ-4 создан экспериментальный стенд с возможностью «продувки» модели с инициированием электрического (искрового) разряда в частотном режиме. При различных углах атаки модели ( $0-13^\circ$ ) и при различных энергиях импульса разряда (50-250 мДж) методом скоростной шпирен-визуализации получена пространственно-временная зависимость положения точки отрыва сверхзвукового потока после момента инициирования искрового разряда и до момента начала следующего импульса разряда. На основе сопла Ласкина разработан и создан генератор масляной аэрозоли для проведения лазерной диагностики сверхзвукового течения на основе метода Particle Image Velocimetry (PIV). С помощью PIV были подтверждены данные о положении точки

отрыва потока при различных углах атаки. Для синхронизации системы PIV с нестационарным объектом исследований (импульсный искровой разряд) была разработана и изготовлена высоковольтная схема инициирования разряда на основе генератора Маркса с возможностью установки времени возникновения разряда с точностью  $\sim 1$  мкс. В работе проведено численное моделирование (решение полной системы уравнений газовой динамики с источником тепла на границе раздела сред) влияния импульсного источника энергии на отрывную зону вблизи поверхности профиля, а также проведено сравнение результатов расчета с экспериментом (Рис. 26).

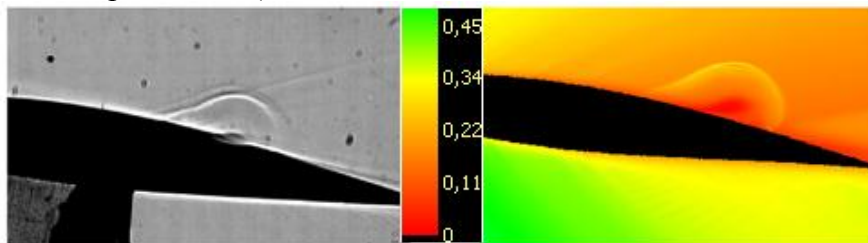


Рис.26. Результат расчета (справа) теплового воздействия на отрывную зону над поверхностью крыла. Эксперимент (ширлен-визуализация) – слева.

Разработана математическая модель сверхзвуковых течений трехкомпонентной двухтемпературной неравновесной плазмы с учетом процессов ионизации – рекомбинации (Шмидт А.А., ФТИ им. Иоффе РАН, Санкт-Петербург). Для численного решения уравнений, входящих в разработанную модель, выбрана оптимальная численная схема высокого разрешения. Сформулирован алгоритм решения уравнения потенциала электрического поля. Разработан соответствующий программный код. С помощью разработанной модели, численного метода и программного кода проведены исследования возможности управления структурой высокоскоростного обтекания тел различной формы. При выполнении численного моделирования, параметры набегающих потоков, типы обтекаемых моделей, а также начальные и граничные условия соответствовали условиям проведения экспериментов на Большой ударной трубе ФТИ РАН. Для воздействия на структуру течения использовалось внешнее магнитное поле, генерируемое катушкой, установленной в модели, и электрический разряд между электродами, установленными на поверхности модели. Типичная компоновка модели и электромагнитной системы приведена на рис. 27. При проведении исследований рассматривались различные варианты компоновок и анализировалось их влияние на структуру потока.

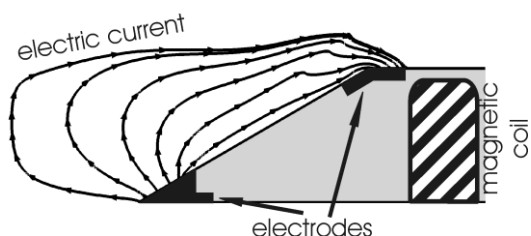


Рис. 27 Компоновка модели конус-цилиндр с установленной магнитной катушкой и электродной системой.

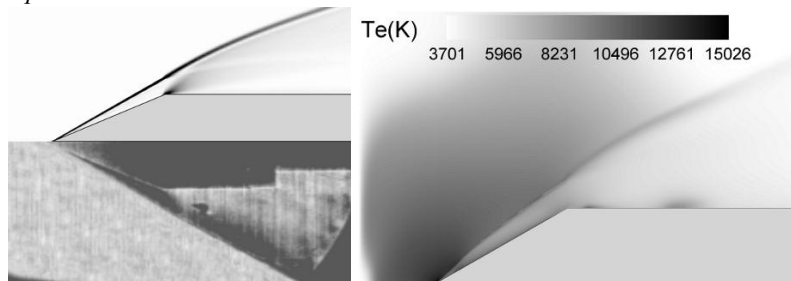


Рис. 28 Сравнение полученных результатов с экспериментальными данными (слева), распределение температуры электронов (справа).

воздействия на структуру потока. На рис. 28 приведены результаты сравнения полученных данных моделирования с экспериментом (слева) и типичное распределение температуры электронов (справа).

В ходе моделирования получены детальные распределения скорости потока, температур электронов и тяжелых частиц, степени ионизации, давления и плотности вблизи обтекаемого тела. Определен диапазон параметров электромагнитного поля, необходимых для эффективного

### Направление 3: Многомасштабные модели прочности и работоспособности материалов: от наноуровня до реальных конструкций

Проведено математическое моделирование процессов деформирования неупругих сыпучих тел с большими деформациями с использованием пакета MSC.Marc (Аннин Б.Д., Коробейников С.Н., ИГиЛ СО РАН, Новосибирск). Сравнением с известными экспериментальными данными показано, что в условиях преимущественного сжатия теория пластичности с поверхностью текучести Хубера – Мизеса хорошо описывает предельные состояния неупругих сыпучих тел, но к неудовлетворительным результатам приводит использование поверхности текучести Друкера – Прагера. Наоборот, в условиях преимущественного растяжения теория пластичности с поверхностью текучести Друкера – Прагера хорошо описывает предельные состояния таких тел, но к неудовлетворительным результатам приводит использование поверхности текучести Хубера – Мизеса.

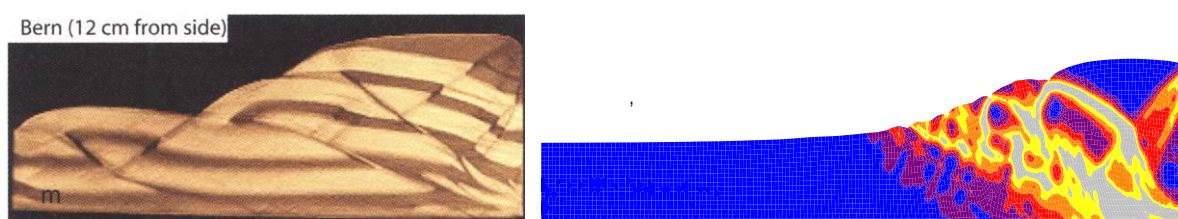


Рис. 1. Задача о сжатии песка: аналоговый эксперимент и компьютерное моделирование (большие упруго-пластические деформации, функция текучести Хубера-Мизеса)

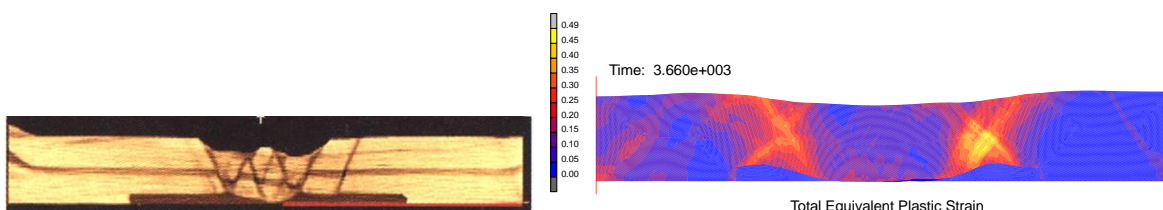


Рис. 2. Задача о растяжении песка: аналоговый эксперимент и компьютерное моделирование (большие упругопластические деформации, функция текучести Друкера-Прагера)

Получены точные выражения векторов внутренних сил и матрицы касательной жесткости элемента с трехчастичным потенциалом энергии изменения угла между соседними ковалентными связями. Компьютерное моделирование показывает, что закрученная по торцам нанотрубка типа «кресло» в после-критическом режиме деформирования разрушается около торцов при достаточно больших углах закручивания, а при решении этой же задачи с приближенным двухчастичным потенциалом энергии трубка деформируется без разрушения вплоть до полного оборота ее торцов. Проведены экспериментальные исследования по влиянию температуры на прочность сферопластика.

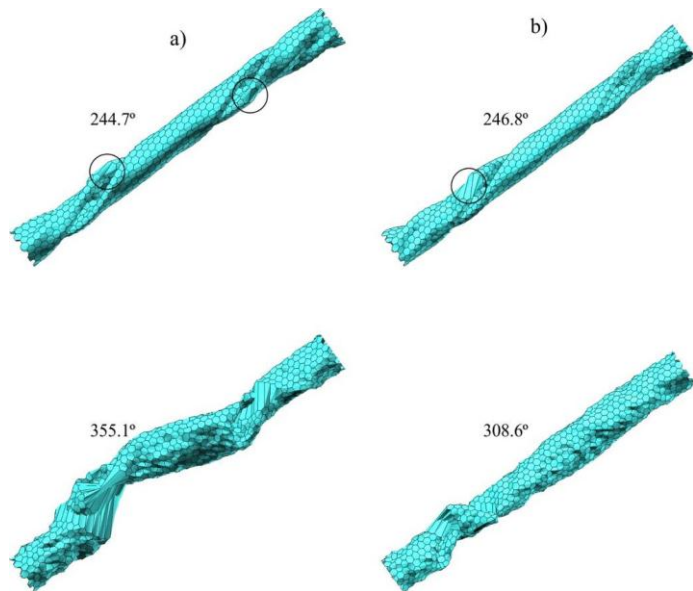


Рис. 3. Формы закритического деформирования и сценарии разрушения нанотрубки типа «кресло» при учете энергии изменения углов между ковалентными связями тречастичным потенциалом: (а) в решении задачи без возмущений; (б) с возмущающими силами.

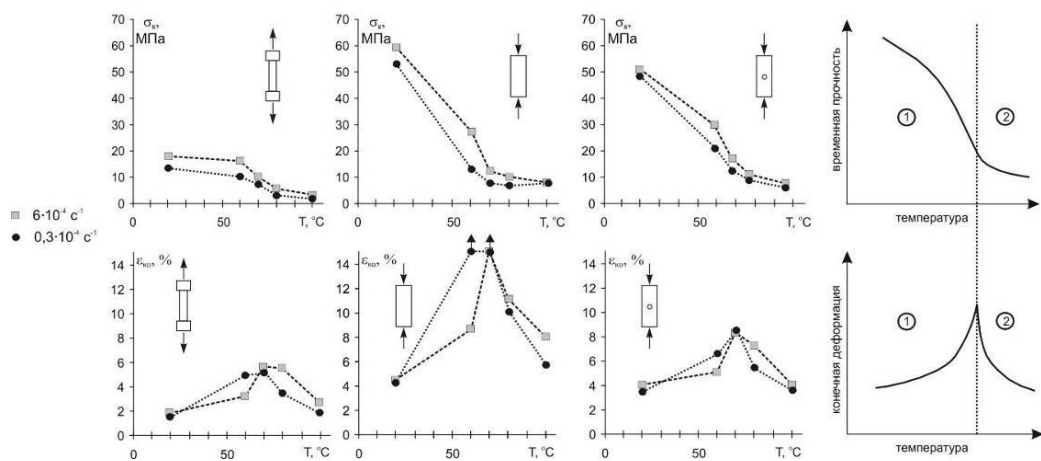


Рис. 4. Зависимости временной прочности и конечной деформации от температуры и скорости деформирования при разных видах нагружения.

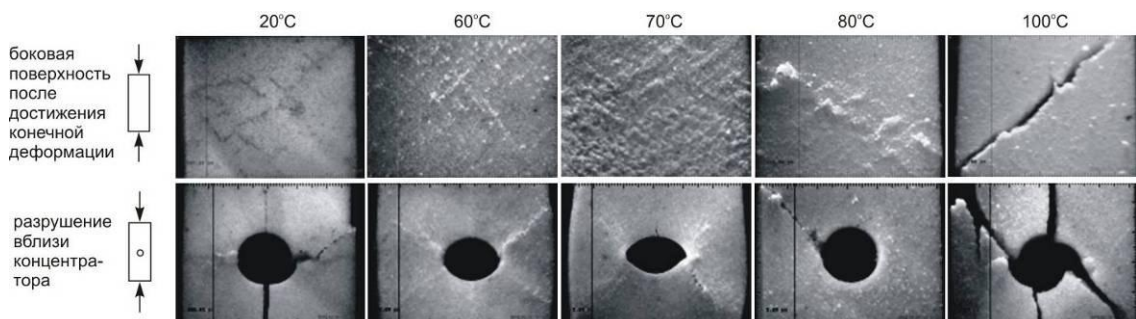
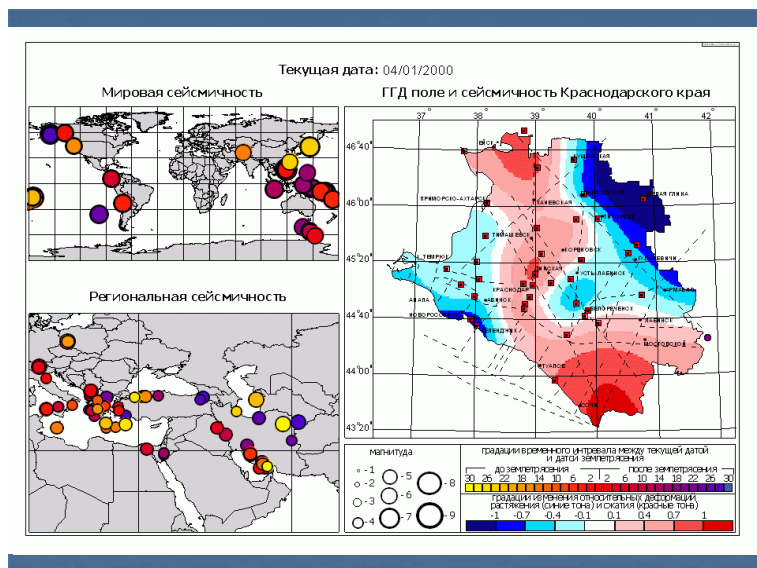


Рис. 5. Разрушение сферопласта при разных температурах и условиях нагружения.



Впервые в результате применения векторных собственных функций для исследования напряженно-деформированного состояния трехмерных блочных структур вместо традиционной системы трех связанных псевдодифференциальных уравнений получены система из двух уравнений и отщепленное отдельное уравнение (Бабешко В.А., НИЦ КубГУ, Краснодар). Это позволило уже доступным для практических приложений методом исследовать граничные задачи для наноразмерных блочных структур, производственных плит произвольной формы и литосферных плит. На основе полученных результатов выдвинута теория существования медленных сейсмических волн, получившая теоретическое и экспериментальное обоснование, а также развита теория локализации природных процессов в окрестностях неоднородностей, на основе которой развиваются методы моделирования аномальных природных явлений («природных вирусов»). Теоретическая составляющая исследования включала необходимость разработки метода, позволяющего эффективно сочленять блочные элементы, составляющие блочные структуры. Этот результат был достигнут путем применения векторных собственных функций при использовании блочных элементов в граничных задачах для уравнений Ламе. В результате, для исследования проблемы были построены система из двух псевдодифференциальных уравнений и отщепленного отдельного псевдодифференциального уравнения, вместо традиционной системы из трех уравнений, трудно исследуемой. Последнее позволило уже доступным для практических приложений методом исследовать граничные задачи и, в частности, выдвинуть теорию существования медленных сейсмических волн, объясняющих «дальнодействие» сейсмической напряженности в Земле. С применением этих результатов развивается теория локализации природных процессов в окрестностях неоднородностей, в том числе в механике деформируемого тела, связанная с проявлением «природных вирусов».



Ежедневные колебания поверхности территории Краснодарского края, север и юг поднимаются, восток и запад - опускаются результат прохождения медленных сейсмических волн.

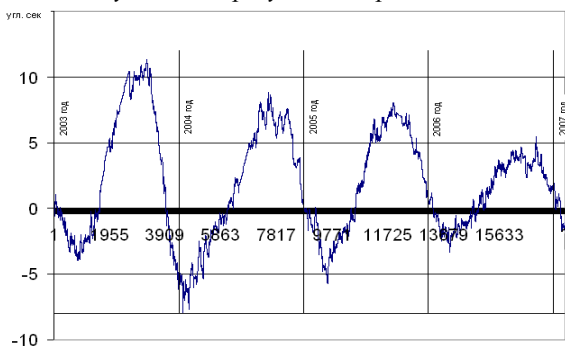


График наклона восток-запад за период 2003-2006 гг. с вычетом линейного тренда литосферной плиты в Краснодарском крае, на котором просматриваются локальные колебания, вызванные прохождением медленных сейсмических волн.

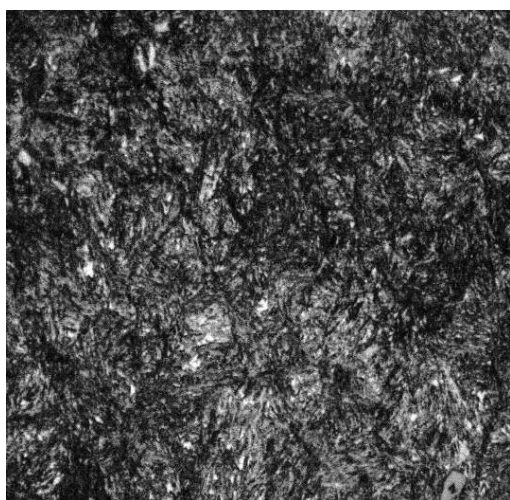
При разработке высокопрочного состояния материала необходимо учитывать следующие явления (Баных О. А., ИМЕТ РАН, Москва):

1) Механическое поведение материала с трещинами. Явление деформационного упрочнения у поверхности вновь образованных несплошностей (трещин, пор) способно препятствовать их дальнейшему росту или замедлять его, пока не будет исчерпан ресурс деформационного упрочнения материала в других участках или у других несплошностей.

2) Явление отрыва по внутренним поверхностям раздела относят к числу факторов, жестко ограничивающих уровень вязкости разрушения и, следовательно, возможность достижения высокопрочного состояния.

3) Декогезия по границам частиц упрочняющей фазы и включений. Упрочнение выделениями второй фазы – один из основных путей к формированию высокопрочного состояния стали. Декогезия по субграницам зерен матрицы.

Присутствие примесей и легирующих элементов при достаточно высокой концентрации опасно в связи с возможностью потери зернограницной прочности. Примером реализации представленных выше критериев высокопрочного состояния является разработка новой



*Микроструктура УКС x500*

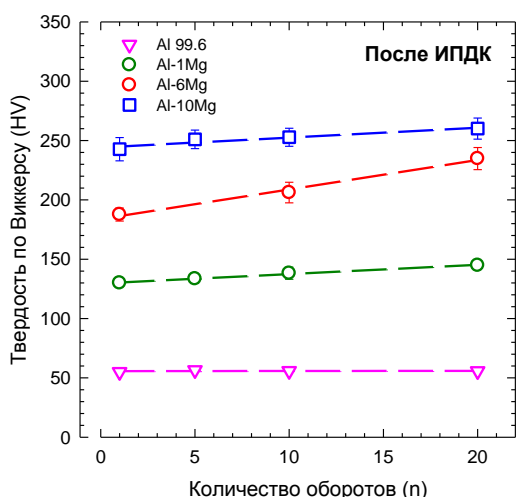
экономнолегированной ультрапрочной конструкционной среднеуглеродистой низколегированной стали мартенситного класса с карбидным упрочнением (УКС). При разработке стали были рассмотрены и учтены основные пути повышения конструктивной прочности низколегированной стали, прежде всего вклад мартенситного превращения в уровень прочности. Основное внимание уделили разработке упрочняющей термической обработки, которая позволила реализовать равномерную мелкодисперсную структуру исходного аустенита, получить в основном реечную структуру мартенсита и сформировать наиболее благоприятное количество и распределение остаточного аустенита. Из анализа микроструктуры следует, что легирование и упрочняющая термическая обработка подобраны оптимально.

Что привело к формированию чрезвычайно мелкодисперсной структуры мартенсита, и, как следствие, к высокому уровню комплекса механических характеристик. Данный материал предполагается использовать в изделиях, работающих в условиях ударно-волнового динамического нагружения. Проведенные натурные испытания трубной заготовки из разработанной стали показали возможность нагружения давлением  $\sim 0.4$  ГПа и температурой  $\sim 2700^\circ\text{C}$  пороховых газов в течение 7 мс без разрушения.

Впервые даны представительные оценки физико-механических свойств соленосных глин, во многом определяющих процессы деформирования и разрушения подработанного соляного массива (Барях А.А., ГИ УрО РАН, Пермь). На основании этих результатов методами математического и физического моделирования установлена степень влияния мощности и влажности глинистых прослоев, залегающих в кровле камер, на несущую способность целиков. Новыми представляются подходы к параметрической настройке геомеханической модели деформирования неоднородных междукамерных целиков с глинистыми прослоями, базирующиеся на согласовании расчетных оценок несущей способности модельных образцов, нормированной на соответствующий показатель для однородного образца, и результатов физического моделирования. Предложенная схема калибровки математических моделей может быть распространена на широкий класс целиков, характеризующихся сложным строением и пространственной конфигурацией. Эксперимен-

тально установлен предельный уровень нормальных напряжений, при котором имеет место практически идеальный упруго-пластический характер деформирования глинистых контактов при сдвиге. Построены паспорта пиковой и остаточной прочности глинистых контактов. Установлено, что сдвиговая жесткость глинистого контакта на допредельной стадии практически не зависит от величины нормального усилия и характеризуется относительно стабильным значением. Впервые исследовано проявление масштабного эффекта в соляных породах с глинистым контактом при его разрушении в режиме сдвиг со сжатием. Методами математического моделирования установлены возможные типы разрушения пород слоистой неоднородной кровли очистных камер: образование трещин отрыва и сдвига, расслоение по глинистым контактам. На основе их анализа впервые сформулированы физические условия реализации обрушения пород кровли.

Проведен динамический анализ функционально-градиентных материалов со случайными параметрами, что позволило выяснить влияние неидеальностей на динамические процессы в таких материалах (Беляев А.К., ИПМаш РАН, Санкт-Петербург). Разработана методика, позволяющая определять геометрические характеристики внутренней структуры металлических пен. Выяснена степень влияния водорода на статическую прочность трубопровода. Также обнаружена прямая корреляция между снижением усталостной прочности материала и концентрацией связанного водорода в нем.



*Изменение твердости образцов материалов исследования после ИПДК при КТ и  $n = 1, 5, 10$  и  $20$  (обобщенные)*

твердость Al-6%Mg имеет выраженную тенденцию к возрастанию, что свидетельствует о дополнительных механизмах упрочнения в этом состоянии, в первую очередь, за счёт образования зернограницных сегрегаций.

В тонкостенных оболочках вращения, находящихся под действием давления, с нарастанием нагружения развивается сложная картина нелинейного деформирования с потерей устойчивости формы объекта (Ганеева М.С., ИММ КазНЦ РАН, Казань). Процесс усложняется для нагружения, неосесимметричного по окружной координате. Указанные вопросы хорошо изучены для цилиндрических оболочек и недостаточно для других оболочек вращения. Необходимо иметь представление об ожидаемом характере нелинейного деформирования и потери устойчивости таких объектов. Численно исследованы нелинейный изгиб и устойчивость сферических оболочек различной тонкостенности и подъемности при осесимметричном и неосесимметричном нагружении. На рисунках представлены результаты вычислений для полусферической оболочки с отношением радиуса к

За отчётный период были проведены работы по получению и исследованию наноструктурных алюминиевых сплавов системы Al-Mg с целью установления зависимости их параметров от концентрации магния (1, 6, 10 вес.%) и степени деформации интенсивной пластической деформации (ИПДК), использованной для их наноструктурирования (Валиев Р.З., Институт Механики УНЦ РАН, Уфа). Были получены соответствующие зависимости твёрдости материалов, а также получены изображения микроструктуры методом просвечивающей электронной микроскопии. Показано, что сплав с содержанием Mg 6% демонстрирует аномальную зависимость прироста твёрдости при повышении степени деформации ИПДК: в отличие от тенденции к насыщению этого параметра у других сплавов,

толщине  $a/h = 100$  при равномерно распределенном давлении  $P = Q$  (штриховые линии) и неосесимметричном по окружной координате  $\varphi$  нагружении  $P = Q[1 + \sin(\theta - \theta_0)(\cos \varphi + 0,5 \cos 2\varphi)]$  (сплошные линии) для материалов с высоким (черные линии) и низким (красные линии) пределом текучести. Тонкая прямая Л – линейное решение. При одинаковом среднем давлении  $Q$  полный груз на поверхность оболочки при осесимметричном и неосесимметричном нагружении одинаков. Для неосесимметричного нагружения графики построены для наиболее нагруженного меридиана  $\varphi = 0$ . Видно значительное влияние на напряженно-деформированное состояние оболочки вида нагружения и уровня предела текучести материала. Расчеты показали разнообразие форм потери устойчивости. При осесимметричном нагружении возможно выворачивание полюса (рис. 7, кривая 1), образование кольцевой вмятины в окрестности основания (рис. 7, кривая 2). До достижения верхней предельной нагрузки при осесимметричном нагружении определяются нагрузки бифуркации (рис. 6, точки К), при которых в оболочке появляется новая форма с волнами по параллели; эта ветвь нелинейного неосесимметричного решения здесь не получена. При неосесимметричном нагружении образуется единичная глубокая вмятина около основания (рис. 7, кривые 3, 4). При неосесимметричном нагружении потеря устойчивости наступает при значительно меньшем общем грузе на оболочку, чем при равномерно распределенном давлении.

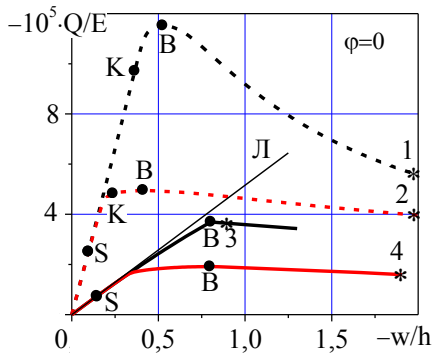


Рис. 6. Зависимость нагрузки от прогиба. S – достижение предела текучести материала, K – волнообразование по параллели, B – верхняя предельная нагрузка потери устойчивости.

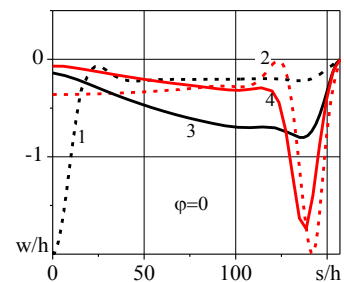
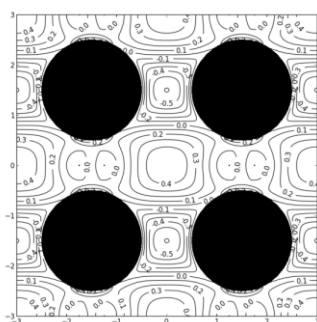


Рис. 7. Этюры прогибов по меридиану для послекритических состояний. Значения нагрузки для кривых 1–4 соответствуют точкам 1–4 на рис. 6.

Продолжено развитие методов дискретно-континуального моделирования слоистых систем с наномасштабной структурой (Гольдштейн Р.В., ИПМех РАН, Москва). Построены многомасштабные модели фуллеренов и систем графеновых слоев, содержащих фуллерены, с учетом нековалентных взаимодействий между молекулами системы. Проведено численное моделирование по определению характеристик деформирования фуллеренов и систем графеновых слоев, содержащих фуллерены. Рассмотрена двумерная модель упругого тела ослабленного квадратной решеткой круглых пор-отверстий. Проанализированы прочностные характеристики и концентрации напряжений в трех разных решетках в условиях одноосного растяжения/сжатия в различных направлениях. Показано, что при условиях сжатия разрушение может появиться внутри материала, а не на краю отверстий. В плотных решетках зависимость величин концентраций от структурного параметра (отношения промежутка между отверстиями к радиусу отверстий) степенная. Рассмотрена задача о потере устойчивости отслоения покрытия из-за наличия в нем собственных деформаций сжатия, вызванных, такими причинами как, нагрев, химические превращения, наличие поверхностных и интерфейсных остаточных напряжений. Выражение для критического сжимающего напряжения получено при граничных условиях на концах отслоения в виде обобщенной упругой заделки (компоненты вектора смещения и угол поворота в

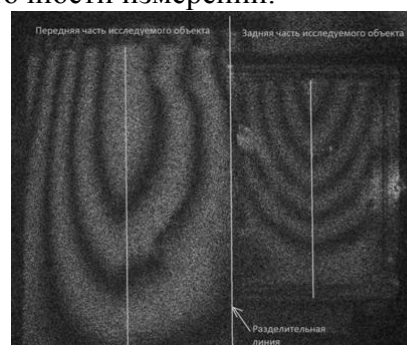
месте заделки связаны с действующим главным вектором и главным моментом усилий посредством матрицы (3x3) упругих коэффициентов). Отличие критического напряжения от соответствующей величины для жестко защемленной пластины определяется безразмерным параметром - комбинацией упругих констант покрытия и подложки и отношения длины отслоения к толщине. Разработана модель разупрочнения материалов, основанная не термофлуктуационной теории разрушения в сочетании с моделью концевой области трещины. Предполагается, что в начальный момент времени в материале существует область ослабленных связей, которая рассматривается как трещина, берега которой взаимодействуют. Долговечность связей в концевой области трещины (и, в итоге, долговечность соединения материалов) определяется с учетом неоднородного распределения напряжений в концевой области трещины. Приведены результаты модельных расчетов, позволяющие оценить характерные уровни внешних разрушающих нагрузок при выбранных параметрах материалов. Для монокристаллов с анизотропными упругими свойствами выяснена зависимость модулей Юнга и коэффициентов Пуассона от их ориентации относительно направления растяжения. Выявлены кристаллы с коэффициентом Пуассона, превосходящим 0,5 и близким к -1. Для кубических и гексагональных кристаллов получены аналитические выражения для коэффициентов Пуассона, усредненным по поперечным направлениям. Между усредненным по поперечным направлениям коэффициентом Пуассона и модулем Юнга установлена линейная связь. Для кубических и гексагональных кристаллов с коэффициентом Пуассона, усредненным по поперечным направлениям, предложена классификация. Разработана методика спекл-интерферометрической дилатометрии трёхмерных объектов. Выполнено усовершенствование оптической схемы имеющегося в лаборатории механики прочности и разрушения материалов и конструкций ИПМех РАН спекл-интерферометра, обеспечившее возможность регистрации одной спекл-интерферограммой полей перемещений точек, принадлежащих фронтальной, боковой и тыловой сторонам объекта. На модельном образце из гипса в форме прямоугольного параллелепипеда отработана методика регистрации полей температурного расширения по боковым плоскостям параллелепипеда, проведены измерения коэффициента температурного расширения гипса. В сравнении с существующими дилатометрами, обеспечивающими дилатометрические измерения одновременно не более чем в двух точках поверхности объекта, предложенная разработка спекл-интерферометрической поверхностной дилатометрии объекта обеспечивает получение существенно большего объёма дилатометрической информации при сохранении достаточного уровня точности измерений.



*Изолинии максимального главного напряжения в квадратной решетке пор при вертикальном одноосном сжатии (максимум главного напряжения достигается в точках, максимально удалённых от центров отверстий, а не на контурах отверстий)*



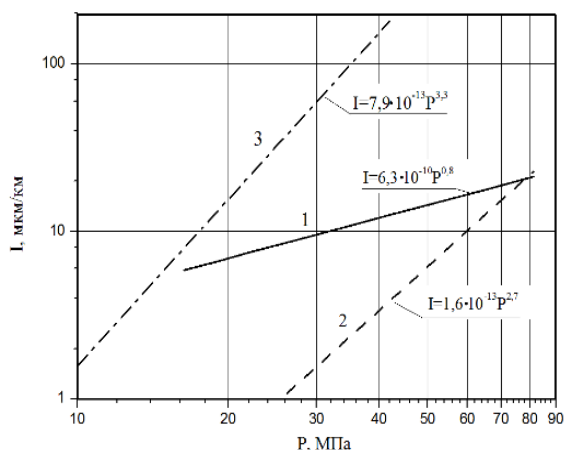
*Общий вид спекл-интерферометрического дилатометра и его оптических элементов*



*Передняя и задняя вертикальные грани гипсового параллелепипеда и граница между спекл-интерферограммами, одновременно снимаемыми с его передних и задних боковых поверхностей при температурном нагружении его верхней грани*

Разработан вариант иерархической реологической модели металлических сплавов при больших высокотемпературных пластических деформациях, описывающей совместное влияние процессов возврата, рекристаллизации и динамического деформационного старения (Горкунов Э.С., ИМаш УрО РАН, Екатеринбург). Исследованы закономерности влияния микро- и субмикроструктурной структуры, сформированной в тонких слоях композитов на основе низкоуглеродистых сталей, алюминия и его сплавов, а также в стали 12ГБА в процессе интенсивной пластической деформации на механические свойства и характеристики ударной вязкости и динамической трещиностойкости. Проведен комплекс исследований по установлению для металлических сплавов связи между параметрами фрикционно-выглаживающих обработок и структурно-фазовым состоянием, шероховатостью поверхности, механическими характеристиками, напряженным состоянием и поврежденностью поверхностного слоя. Создана установка для исследования магнитных характеристик материалов в условиях двухосного растяжения в упруго-пластической области с целью установления закономерностей изменения характеристик магнитного состояния металла от действия внешних силовых факторов. Разработаны основы математического аппарата, позволяющего рассчитать диаграмму отрыва слоёв многослойных полос, подвергнутых интенсивной пластической деформации при прокатке, и получить критерии устойчивости и неустойчивости данного процесса. Разработана методика и исследована зависимость предельной степени деформации от показателя напряженного состояния для малопластичной структурной составляющей, находящейся в окружении пластичной матрицы, на примере микроразрушения силицидов в сложнелегированной латуни ЛМцАЖКС.

Композиты на основе углеродного волокна и пластиковой матрицы (углепластики) находят применение в качестве трибологического материала в сопряжениях, работающих в водной среде (Горячева И.Г., ИПМех РАН, Москва). Углепластики характеризуются коррозионной стойкостью, малой гигроскопичностью, способностью работать с водяной смазкой. Перспективной технологией улучшения трибологических свойств углепластика является введение в композит наноструктур на основе соединений фторопласта. В 2012 году в рамках совместных исследований в Институте металлургии и материаловедения РАН отработана технология получения теломеров тетрафторэтилена методом радиационного синтеза и осаждения их на углеродную ткань в виде тонкой фторполимерной плёнки.



Сравнение зависимостей интенсивностей изнашивания от давления для базового (1) и исследуемого (2, 3) углепластика. Контртело сталь ШХ15, HRC 60...62, Ra 0,3 мкм (1, 2); сталь 20Х13, HRC 30...32, Ra 0,3 мкм (3)

Из обработанной таким методом ткани получен композитный материал - модифицированный углепластик УГЭТ-УРАЛ-МФ-1. Проведенные трибологические испытания с образцами из модифицированного углепластика, в процессе которых измерена скорость изнашивания материала в паре со стальным контртелом (стали ШХ15 и 20Х13), и сравнение с результатами аналогичных испытаний с не модифицированным углепластиком марки УГЭТ-УРАЛ-Т15Р-ЭХО показали, что модифицированный материал имеет более высокую износостойкость в диапазоне давлений 20-80 МПа в паре со сталью ШХ15, чем эталонный образец. Анализ зависимости интенсивности изнашивания от давления показал, что наибольший эффект от модификации углепластика

достигается при относительно небольших нагрузках. Выполнена оценка трибологических характеристик тонких (до 300 нм) оксидных пленок, полученных «карбоксилатным» методом и отличающихся химическим составом, толщиной, материалом подложки (сталь либо кварцевое стекло). Исследование включало в себя изучение поверхности и определение шероховатости образцов с помощью атомно-силового и электронного сканирующего микроскопа, определение упругих свойств покрытий по результатам индентирования, исследование фрикционного взаимодействия покрытий с контртелами из различных материалов (сталь, алмаз, сапфир). Установлено, что при разных нагрузках реализуются различные механизмы разрушения покрытий: постепенное изнашивание со стабильным значением коэффициента трения в пределах 0.3 при малых нагрузках и хрупкое разрушение с выкрашиванием частиц покрытий при больших нагрузках; в последнем случае коэффициент трения на начальном этапе совпадает с коэффициентом трения при малых нагрузках, затем происходит его резкое увеличение и задира. Результаты будут использованы для определения оптимального химического состава и толщины покрытия, обеспечивающих увеличение долговечности узлов трения.

Исследованы характерные форма и скорость кумулятивной струйки жидкости, возникающей на поверхности эллипсоидального кавитационного пузырька при его схлопывании в контакте с плоской твердой стенкой (Ильгамов М.А., ИММ КазНЦ РАН, Казань). В частности, установлено, что с изменением начальной формы пузырька радиусом 1 мм в воде в комнатных условиях от слегка приплюснутого эллипсоида (рис.8а) до слегка вытянутого (рис.8б) скорость струйки убывает от 580 до 100 м/с, а ее диаметр возрастает от 30 до 330 мкм (рис.8с)

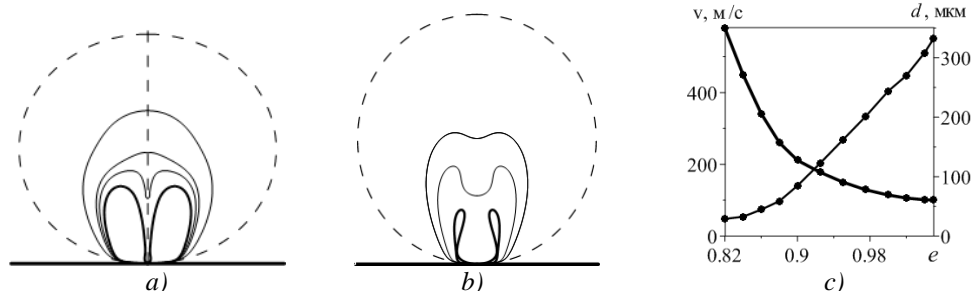


Рис. 8 Деформация эллипсоидальных кавитационных пузырьков у стенки при схлопывании (а,б) и характерные скорость и диаметр кумулятивной струйки жидкости, возникающей на поверхности пузырька, в момент ее удара по стенке в зависимости отношения полуосей  $e$  эллипсоидальной начальной формы пузырька (с).

Разработаны математическая модель, методика расчета и выполнено исследование особенностей упруго-пластического деформирования при приложении к поверхности металлического тела нагрузки, характерной для удара кумулятивной струйки жидкости, образующейся на поверхности примыкающего к телу кавитационного пузырька при его схлопывании. Закон нагружения (рис.9а) определяется на основе численного решения задачи гидродинамики об ударе цилиндрической струйки жидкости с полусферическим концом по нормали к плоской жесткой стенке. Показано изменение конфигурации пластических зон приповерхностной области тела в зависимости от скорости кумулятивной водяной струйки, ударяющей по телу из алюминиевого сплава (рис.9б-д). При скорости меньше 240 м/с пластических деформаций не возникает, при скорости 290 м/с пластическим деформациям подвергается приповерхностная область с размерами около 1/3 радиуса струйки как в радиальном, так и в осевом направлениях (рис.9с). При этом в небольшой конусообразной зоне тела в окрестности центра приложения нагрузки пластические деформации не возникают.

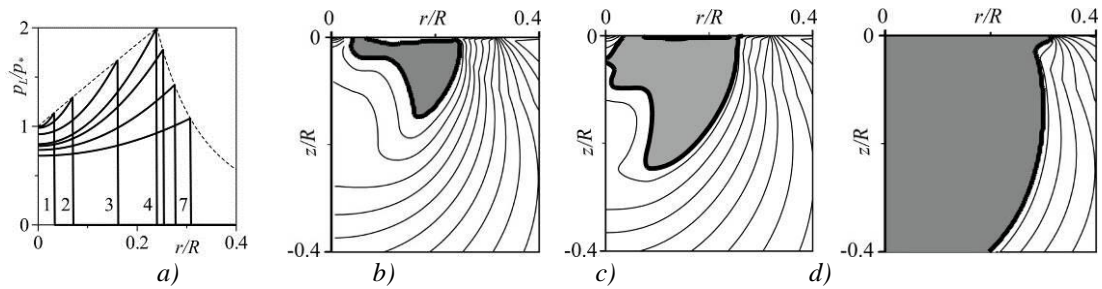


Рис. 9. Изменение радиального распределения нагрузки во времени (а) ( $R$  – радиус струи,  $p_L$  – давление жидкости,  $p_*$  – давление жидкости в центре области нагружения в начале приложения нагрузки, номер кривой соответствует моменту времени). Изолинии максимальных по времени значений безразмерной интенсивности напряжений  $\zeta_i = \sigma_i/\sigma_i^*$  ( $\sigma_i^*$  – «среднее» значение интенсивности напряжений в теле) при скорости струи 270 (b), 290 (c) и 380 м/с (d). Области пластичности закрашены.

Пренебрежение пластичностью материала или упрощение закона нагружения (принятие нагрузки однородной по площади ее приложения) приводят к значительному изменению конфигурации зон пластических деформаций.

Разработана и исследована феноменологическая модель наноразмерной сегнетоэлектрической пленки  $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ . (Калинчук В.В., НИЦ КубГУ, Краснодар). Изучено поведение физических констант наноразмерной пленки при комнатной температуре для всей области концентраций при различных толщинах и подложках. Установлено существенное влияние толщины пленки на ее динамические свойства и структуру поверхностного волнового поля при электрическом возбуждении. На основе количественных моделей сегнетоэлектриков  $BaTiO_3$  и  $SrTiO_3$  разработана феноменологическая модель и исследовано поведение физических констант наноразмерной сегнетоэлектрической пленки  $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$  при комнатной температуре для всей области концентраций, при различных подложках и различных толщинах пленки, определяемых параметром misfit strain ( $m_s$ ). Анализ показал, что при увеличении деформации пленки, определяемой параметром  $m_s$ , значения упругих, пьезоэлектрических и диэлектрических констант существенно изменяются, а форма потенциала ортотропного в естественном состоянии электроупругого материала приближается к кубической симметрии. Для наноразмерного слоя  $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$  (BST08) исследованы спектральные свойства элементов  $K_{32}$  (рис.10) и  $K_{42}$  (рис.11) матрицы функции Грина электроупругого слоя с заземленным и незаземленным основанием, которые характеризуют структуру поверхностного волнового поля (перемещение  $u_3$  – рис.10) и электрический потенциал (рис.11) при электрическом возбуждении. Сплошными и прерывистыми линиями представлены полюса и нули элементов  $K_{32}$  и  $K_{42}$ , цифрами 1 и 2 отмечены кривые при  $m_s=0$  (синие линии) и  $m_s=-1$  (красные линии) соответственно. При этом кривые 2 на рис.11 представляют собой слившиеся кривые нулей и полюсов.

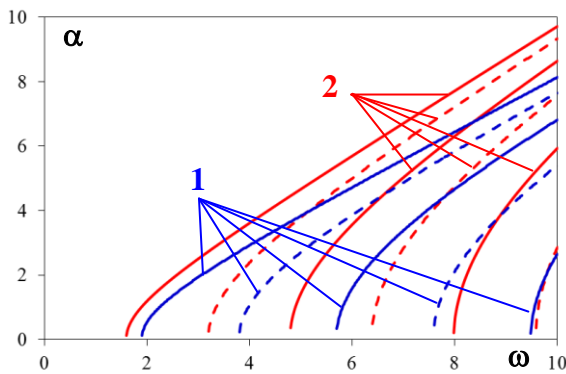


Рис.10

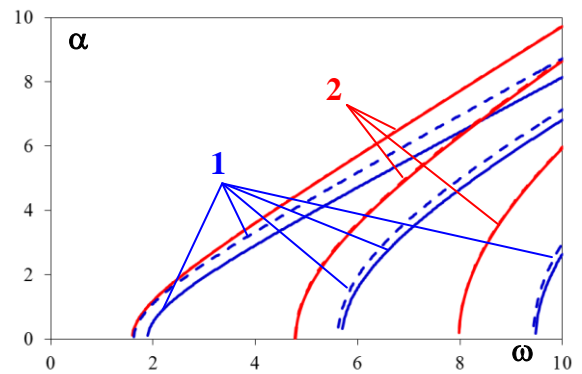
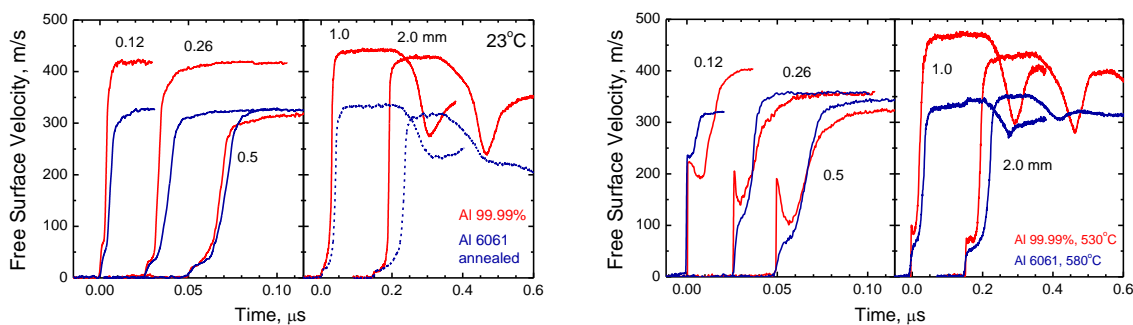


Рис.11

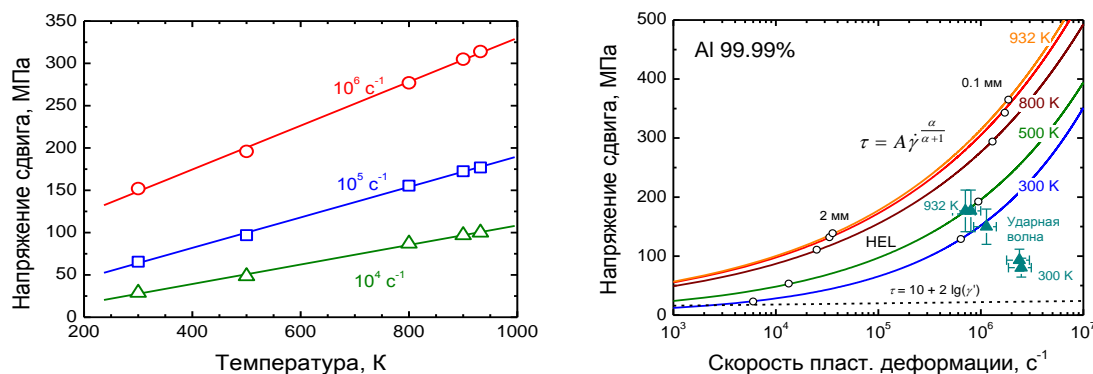


Как следует из графиков, увеличение  $m_s$  усложняет структуру поверхностного поля перемещений за счет сдвига спектральных кривых в низкочастотную область. При этом структура поверхностного электрического поля существенно упрощается за счет наложения кривых нулей на полюса. Этот факт может иметь существенное значение при разработке акустоэлектронных устройств с использованием наноразмерных пленок.

Проведены систематические измерения эволюции ударных волн в высокочистом алюминии и отожженном алюминиевом сплаве 6061 на расстояниях от 0.1 до 2 мм в температурном диапазоне от 296 К до 932 К (Канель Г.И., ОИВТ РАН, Москва). На основании измерений затухания упругих предвестников определена температурно-скоростная зависимость начального напряжения течения в диапазоне скоростей деформации  $10^4 - 10^6 \text{ c}^{-1}$  при температурах вплоть до точки плавления алюминия. По результатам измерений времени нарастания параметров в пластической ударной волне найдено, что при том же напряжении сдвига скорость пластической деформации возрастает по крайней мере на порядок после деформации  $\sim 2\%$ . Обнаружено, что при высоких скоростях деформации и повышенных температурах напряжение течения (динамический предел текучести) для сплава меньше, чем для алюминия. Полученные экспериментальные данные описаны эмпирическим определяющим соотношением, получены предварительные результаты компьютерного моделирования с его применением.



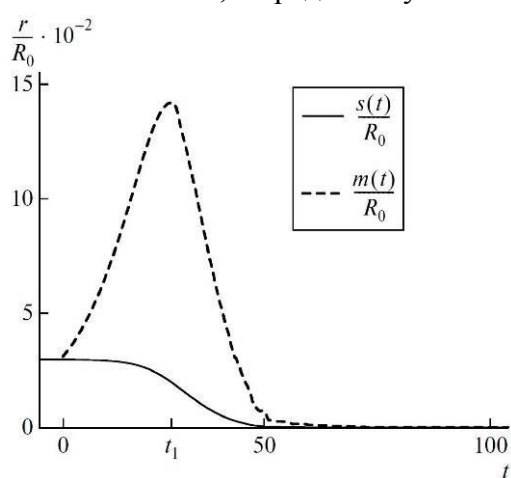
Результаты измерений эволюции ударных волн в чистом алюминии и алюминиевом сплаве 6061 при нормальной и повышенных температурах.



Температурные зависимости начального напряжения течения в чистом алюминии при трех фиксированных скоростях пластической деформации. Линейный характер зависимостей согласуется с фоновым механизмом торможения дислокаций.

Зависимости начального напряжения течения (линии) и напряжения течения после 2% деформации (точки) от скорости пластической деформации и температуры для высокочистого алюминия.

Разработана математическая модель больших деформаций, когда необратимые деформации представляются как пластическими, так и деформациями нелинейной ползучести (Ковтанюк Л.В., Буренин А. А., ИАПУ ДВО РАН, Владивосток). На примере задачи о поведении сферического дефекта сплошности в условиях эксплуатационных нагрузок по типу «нагрузка-разгрузка» в рамках построенной модели указан реологический механизм залечивания микродефектов сплошности вязкоупругопластических материалов. Получены аналитические решения последовательности одномерных квазистатических задач, описывающих процессы вязкоупругого деформирования материала полого шара, зарождения и развития пластического течения в нем при увеличении давления на его внешней границе. Рассмотрен также процесс разгрузки при медленном снятии нагружающего давления и нагревание. Рассчитаны поля напряжений, упругих и пластических деформаций в материале сферического слоя, закономерности продвижения упругопластической границы, уровень и распределение остаточных напряжений и релаксация последних при нагревании. На стадии, предваряющей пластическое течение, считается, что материал подчиняется вязкоупругой модели Фойгта, поверхность нагружения задается условием пластического течения Мизеса, а предел текучести зависит от температуры.



Изменение граничной поверхности микропоры  $s(t)$  и упругопластической границы  $m(t)$

Предложена корректная постановка связанной задачи деформирования и теплопроводности о неизотермическом деформировании тяжелого упруговязкопластического слоя, помещенного на наклонную плоскость. Считается, что обратимое деформирование слоя и его последующее течение происходит за счет нагревания свободной поверхности слоя, в то время как граница слоя на наклонной плоскости является жестко закрепленной. Задача поставлена в рамках модели больших упруговязкопластических деформаций. Получено решение последовательности краевых задач теории больших деформаций материалов с упругими, пластическими и вязкими свойствами, связанной с вязкоупругим деформированием и определением момента времени и места возникновения пла-

стического течения, развитием данного течения, последующей разгрузкой среды, содержащей одиночный сферический дефект сплошности. Рассчитаны уровень и распределение остаточных напряжений в окрестности дефекта и его итоговый размер.

Рассматривается распространение трещины скачками в квазихрупких материалах при циклическом нагружении (Корнев В.М., ИГиЛ СО РАН, Новосибирск). Изучаются стационарное и нестационарное нагружения при пульсирующем приложении нагрузки. Предлагается использовать для анализа указанного процесса диаграммы рис. 12 квазихрупкого разрушения тел при циклическом нагружении. При построении диаграмм используются необходимые и достаточные критерии разрушения по Нейберу – Новожилову, а конкретная реализация критериев выполнена на основе модификации модели Леонова – Панасюка – Дагдейла для трещин нормального отрыва, когда поперечник зон предразрушения совпадает с поперечниками зон пластичности в вершине трещины. Диаграмма на плоскости «внешняя нагрузка – длина трещины» при циклическом нагружении состоит из трех подобластей, в первой из которых длина исходной трещины не меняется (трещина устойчива), во второй длина исходной трещины увеличивается на длину зоны предразрушения при каждом скачке трещины (трещина подрастает, оставаясь устойчивой, а материал охрупчивается только в зоне предразрушения), в третьей длина исходной трещины уве-

личивается катастрофически (трещина неустойчива). Система сама вырабатывает характерный масштаб – длину зоны предразрушения, которая зависит от длины трещины, приложенной нагрузки и характеристик неупругого деформирования материала. Одна из кривых предлагаемой диаграммы напоминает диаграмму Китагава – Такахаша. Рассматривается пульсирующий режим нагружения, амплитуда которого может меняться. Эти амплитуды при однократном нагружении соответствуют амплитудам между критическими нагрузками по необходимому и достаточному критериям разрушения для конкретной длины трещины. Во второй подобласти описан процесс накопления повреждений в зонах предразрушения при линейном и нелинейном суммировании повреждений. Получено условие скачкообразного продвижения вершины трещины. Даны оценки критической длины трещины и критического числа циклов при усталости. Число циклов между скачками вершины трещины подсчитывается по уравнению Коффина, когда принимается во внимание накопление повреждений в материале зоны предразрушения. В замкнутом виде получены критические параметры разрушения рис.13. Полученные соотношения для средней скорости можно рассматривать как структурные формулы для построения кривых Пэриса.

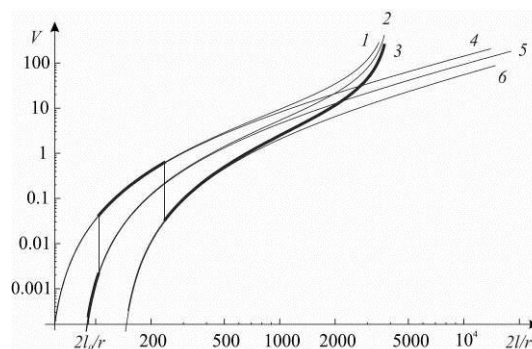
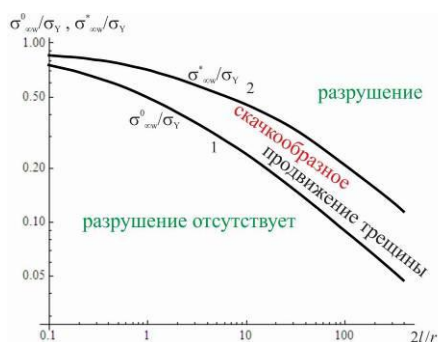


Рис. 12. Диаграмма усталостного разрушения. Рис. 13. Средняя скорость продвижения вершины трещины при переменном нагружении.

На рис. 12, 13 использованы обозначения:  $2l$  – длина трещины;  $r$  – диаметр зерна регулярированной структуры квазихрупкого материала;  $w$  – ширина пластины;  $\sigma_{\infty}$  – заданная амплитуда пульсирующей нагрузки;  $\sigma_Y$  – предел текучести;  $\sigma_{\infty}^0$  и  $\sigma_{\infty}^*$  – критические нагрузки по необходимому и достаточному критериям разрушения;  $\sigma_{\infty}^+$ ,  $\sigma_{\infty}^{++}$ ,  $\sigma_{\infty}^{+-}$  – амплитуды пульсирующих нагрузок при нормальном, повышенном и пониженном режимах нагружения;  $V$  – средняя скорость продвижения вершины трещины.

Начало работ по исследованию механизма самосмазывания полимеров было проведено на сверхвысокомолекулярном полиэтилене (СВМПЭ) – самосмазывающемся полимере, по комплексу свойств, располагающемуся между наиболее ярким представителем самосмазывающихся полимеров – фторопластом (политетрафторэтиленом) и конструкционными полимерами (Краснов А.П., ИНЭОС РАН, Москва). При трении СВМПЭ по полированному и шлифованному контртелам был показан быстрый и обильный «перенос» полимера (СВМПЭ) на шлифованный образец и полное продолжительное отсутствие «переноса» полимера на полированный стальной образец (рис. 14). Это не может быть объяснено исходя из традиционной точки зрения на механизм самосмазывания СВМПЭ, заключающейся в «переносе» частиц полимера на стальную поверхность. В то же время, результаты исследования краевого угла смачивания и электропроводности поверхности трения свидетельствовали о постепенно протекающем процессе модификации, приводящем к созданию не полярной, диэлектрической поверхности.



Рис. 14 Изменение веса полимерного образца при трении по стали (шлифованной и полированной поверхности)

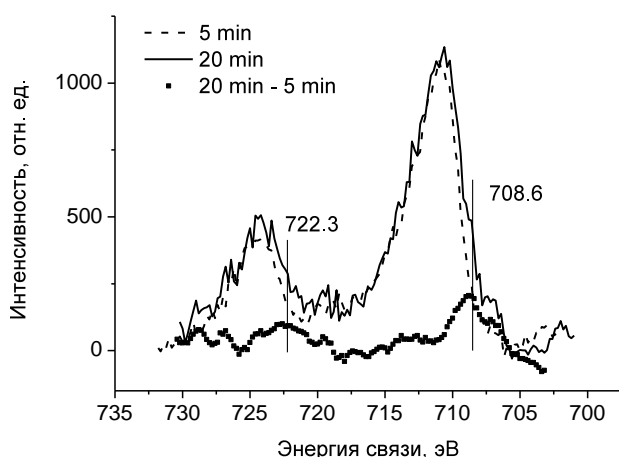


Рис. 15. Рентгенофотоэлектронный (РФЭС) анализ разностных спектров Fe2p (железо) после 5 и 20 минут трения по полированной поверхности стали

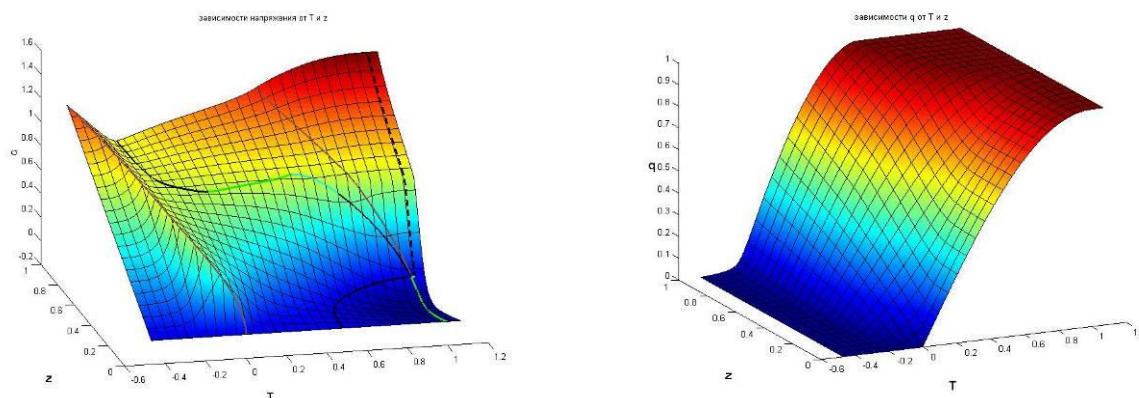
Методом рентгенофотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) проанализирован период «безизносного» трения СВМПЭ в течение 20 минут. Получены спектры C1s, O1s, Fe2p (рис.15), зарегистрированные после 5 и 20 минут и их разностные спектры. Результаты РФЭС свидетельствуют, что в течение первых 20 минут «безизносного» трения на полированной поверхности стали происходит процесс ее модификации на уровне до 10 нм. Он включает ряд физико-химических процессов взаимодействия реакционноспособных соединений Fe и C, возникающих в процессе механоактивации. В результате их взаимодействия развивается процесс физико-химической модификации нанометровой поверхности с образованием новых химических групп, среди которых идентифицирована группа Fe–O–C (железо – кислород – углерод) 708,6 эВ; 727,3 эВ. Полученные результаты свидетельствуют, что с первых моментов трения начинается модификация («обуглероживание») стального контртела с образованием элементоорганических фрагментов. Дальнейший процесс взаимодействия полимера с контртелом связан со вторым этапом модификации поверхности стали продуктами трибохимической деструкции полимера, что измерено гравиметрически с точностью  $1 \cdot 10^{-4}$  гр. При первичных актах взаимодействия свежешлифованной поверхности стали и СВМПЭ также возможно возникновение химических связей Fe–O–C. Сложность их определения на шлифованной поверхности связана со значительной толщиной перенесенного материала, что делает невозможным анализ процессов, происходящих в 10 нм (информационная глубина метода РФЭС) слое между частицами перенесенного СВМПЭ и Fe. Научное значение исследования заключается во впервые полученном экспериментальном доказательстве физико-химического процесса взаимодействия элементов поверхности на первых этапах трения полимера (СВМПЭ) по полированной стали с образованием новых химических групп (Fe–O–C). Практическое значение проведенного исследования заключается в изучении процесса трения СВМПЭ – единственного полимера, используемого в настоящее время в качестве самосмазывающе-

гося материала в имплантатах протезов суставов человека, что позволяет с научных позиций подойти к проблеме повышения его износостойкости.

Для аморфно-кристаллического полимера полиэтилена высокого давления реализован цикл термомеханических экспериментов по сложным траекториям в пространстве «напряжения/деформации – температура – время» (Матвеев В.П., ИМСС УрО РАН, Пермь). Эти результаты являются базовыми установочными и проверочными экспериментами для новой системы определяющих физических соотношений, описывающих взаимосвязь напряженно-деформированного состояния с процессами стеклования и кристаллизации. Анализ экспериментальных результатов, полученных на установке DMA-242C, позволил установить, что олигомеры типа T121 имеют более высокие деформационные характеристики по сравнению с традиционными. Это обстоятельство существенно расширяет область их практического применения. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы в различных областях практического применения исследованных полимерных материалов, в частности, для идентификации параметров определяющих уравнений, описывающих взаимосвязь напряженно-деформированного состояния с температурой и релаксационным процессом стеклования. Сформулирована система уравнений и граничных условий, описывающая напряженно-деформированное состояние полимерных гелей с произвольным распределением жидкости, при конечных деформациях упругой матрицы при различных видах статического и квазистатического нагружения. Она получена из вариационного принципа, вытекающего из базовых принципов термодинамики и механики. С помощью последовательной линеаризации уравнений нелинейной теории сформулирована линейный вариант теории, которая описывает состояние неоднородно набухшего материала в приближении малых деформаций упругой матрицы, малых внешних нагрузках и малых неоднородностях распределения растворителя. Установлена связь констант линейной теории с параметрами нелинейных уравнений состояния полимеров. В рамках нелинейной и линейной теорий сформулирован и изучен ряд модельных задач, описывающих напряженно-деформированное состояние неоднородно набухших в растворителе образцов полимера правильной геометрической формы: плоского слоя, шара, цилиндра. Получены их точные решения. На их основе осуществлен сравнительный анализ деформационного поведения и упругой реакции образцов полимерных гелей с однородным и неоднородным распределением растворителя. Численная модель, отражающая внутреннюю структуру мягкого магнитного эластомера, наполненного микрочастицами магнитомягкого ферромагнетика построена и реализована. Идет работа по тестированию блоков программы и оптимизации каждого из них. Она исключительно трудоемка, поскольку в силу ее новизны, каждый из этапов расчета необходимо обосновать, проверить перекрестно, оценить сходимость используемого итерационного процесса и т.п. На текущий момент имеется полное качественное согласие с результатами двумерного моделирования (проведено в 2009-2011 гг.), идет поиск и устранение причин наблюдающихся количественных (5-10%) расхождений между вариантами методик расчета межчастичных сил. Выполнено теоретическое исследование по проблеме, важной для особого класса мягких магнитных веществ: суспензий полярных (то есть обладающих дипольным моментом) наночастиц в нематических жидких кристаллах. Предметом изучения было влияние приложенного магнитного поля на сдвиг температуры фазового перехода порядок / беспорядок (нематик / изотропная жидкость); получены соотношения общего вида, применимые для нематогенных суспензий как ферромагнитных, так и ферроэлектрических (сегнетоэлектрических) частиц. Работа является одной из первых в мире, где даны корректная физическая интерпретация и формализм для описания указанного эффекта. Колебательное либо вращательное движение малых частиц ферромагнетика в вязкоупругой среде под действием переменного магнитного поля — это очень быстро развивающаяся область ис-

следований. Упомянутая выше микро- и нанореология — лишь один из возможных практических выходов. Другие области приложений не менее интересны, назовем две из них. Магнитоиндукционная гипертермия, где частицы, впрыснутые в живую ткань, вовлекаются внешним полем в интенсивное движение так, что создаваемые магнитные и вязкие потери вызывают контролируемый разогрев. Поскольку резистентность злокачественных клеток к нагреву ниже, чем у здоровых, такая гипертермия позволяет избирательно уничтожать именно плохие клетки. Магнитная нанохирургия, когда тот же способ приведения частиц — размещенных внутри клетки-мишени или прикрепленных к её мембране — в механическое движение используется для прямого разрушения внутриклеточных структур. Тем самым, вредные клетки удастся уничтожить практически без нагревания.

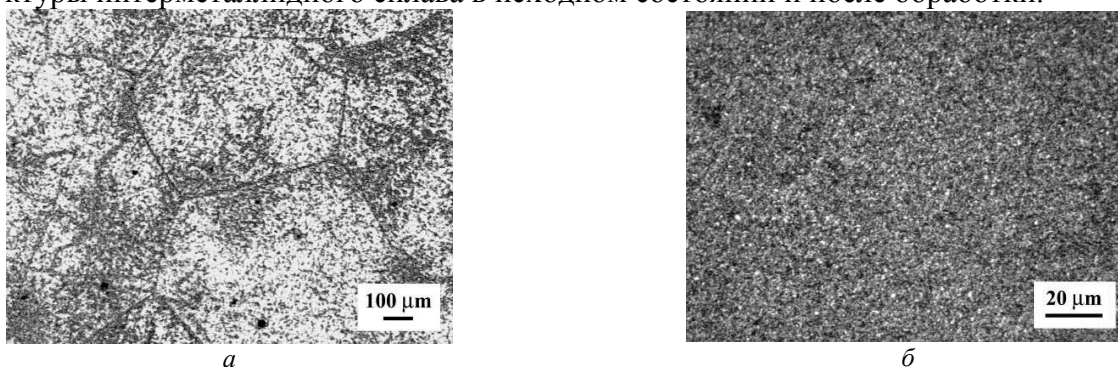
Построена трехуровневая модель поведения сплавов с памятью формы (СПФ), испытывающих термоупругие фазовые и структурные превращения (Мовчан А.А., ИПРИМ РАН, Москва). Элементом наноуровня в аустенитном состоянии является совокупность имеющих общее ребро 4 половинок ОЦК ячеек типа  $B2$ , которые при прямом термоупругом фазовом мартенситном превращении переходят в одну моноклинную с искажениями ячейку типа  $B19'$ . Элементом мезоуровня является совокупность большого количества примыкающих друг к другу низкосимметричных мартенситных элементарных объемов, имеющих одинаковую или одинаково сдвойникованную ориентацию (так называемые мартенситные пластины или иглы). Элементом макроуровня является представительный объем, который может находиться частично в аустенитном, частично в мартенситном фазовом состоянии. В отличие от известных аналогов предполагается, что каждый элемент мезоуровня имеет свое значение напряжения начала неупругого деформирования, которое, вообще говоря, меняется в процессе эволюции данного мезоэлемента. Понятие общего предела текучести представительного объема теряет смысл. Получена своеобразная формулировка закона течения, в рамках которой приращение структурной деформации определяется не значением интенсивности напряжений, а величиной той части мартенситного объема, которая в данный момент испытывает структурное превращение. В качестве иллюстрации решен ряд модельных задач о накоплении неупругих деформаций для случая прямого мартенситного превращения, происходящего под действием немонотонно меняющегося напряжения. Получено численное решение задачи о прямом мартенситном превращении в балке из СПФ, претерпевающей прямое превращение под действием постоянного изгибающего момента. Ниже показаны некоторые результаты решения этой задачи.



*Зависимость продольного напряжения (слева) и объемной доли мартенситной фазы (справа) от координаты  $z$  по высоте сечения и параметра температуры  $T$*

Создание ракетной техники нового поколения требует применения конструкционных жаропрочных материалов, способных обеспечить более высокий уровень эксплуатационных свойств, чем существующий на сегодняшний день (Мулюков Р.Р., ИПСМ РАН,

Уфа). Такими материалами могут быть слоистые композиты типа титановый сплав – интерметаллид, сочетающих хорошие технологические свойства титановых сплавов с высокими жаропрочными свойствами сплавов на основе алюминидов титана  $TiAl$ ,  $Ti_3Al$  и  $Ti_2AlNb$ . Разработка методов получения слоистых композитов является одним из перспективных путей создания новых жаропрочных материалов с малым удельным весом. При выполнении проекта разработан научный подход к получению наноструктурных полуфабрикатов из интерметаллидного сплава на основе орторомбического алюминида титана  $Ti_2AlNb$  посредством термомеханической обработки. Данные полуфабрикаты будут использованы для последующего изготовления слоистых композитов титановый сплав – интерметаллид методом диффузионной сварки давлением. В работе исследованы жаропрочные сплавы, которые могут быть использованы как компоненты слоистого композиционного материала – интерметаллидный О-сплав (ат. %,  $Ti-23Al-22.7Nb-1.1V-0.6Zr-0.2Si-0.3C$ ) и титановый сплав ВТ25У (ат. %,  $Ti-12Al-0.7Sn-2.17Zr-2Mo-0.26W-0.34Si$ ). В исходном состоянии заготовки интерметаллидного сплава имели литую крупнозернистую структуру. Путем термомеханической обработки, включающей всестороннюю изотермическую ковку с понижением температурных этапов ковки от 950 до 800°C, в интерметаллидном материале была создана однородная ультрамелкозернистая структура с минимальным размером структурных элементов около 500 нм, которая может обеспечить снижение температуры диффузионной сварки и повышение качества твердофазного соединения. На рисунке представлены микроструктуры интерметаллидного сплава в исходном состоянии и после обработки.



Микроструктура интерметаллидного О-сплава в литом состоянии (а) и после термомеханической обработки (б).

Исследованы поверхности пяти образцов солнечных батарей (СБ) размером 43.5мм x35.5мм, которые экспонировались на орбитальной станции «Мир» более 10 лет (Мягков Н.Н., ИПРИМ РАН, Москва). Первоначальное состояние поверхности СБ исследовалось по двум неэкспонированным образцам. Исследовалась морфология повреждений, образованных при ударе микрометеорных и техногенных частиц (ММ/ТЧ). Исследовались наноструктуры на поверхности СБ, образованные в результате воздействия собственной атмосферы ОС «Мир». Для этих целей использовались оптические микроскопы: ЛОМО МЕТАМ РВ-21 и Zygo NewView 5022, атомно-силовой микроскоп easyScan (Nanosurf AG) и измерительный комплекс NanoTest 600. Получены следующие результаты:

1) Охарактеризована морфология повреждений СБ, проявляющаяся в виде кратеров, групп кратеров, треков кратеров, пятен и т. д. (рис.16). На каждом образце имеется по одному кратеру размером ~1 мм. Количество кратеров наиболее представительной группы, имеющей размеры от 110 мкм до 1 мкм, колеблется от 262 шт до 1204 шт. на различных образцах. Общая площадь повреждений от ударов ММ/ТЧ составляет всего ~1.8% площади образца. Т.е. повреждения, связанные с ударами ММ/ТЧ не повлияли на работоспособность СБ за время их эксплуатации.

2) На поверхности СБ присутствуют наноструктуры в виде рельефных выростов. Их наличие фиксируется на всех образцах во всех исследованных областях на всех верти-

кальных (1000÷17нм) и горизонтальных (1000÷100нм) масштабах визуализации. Сделано предположение, что структура поверхности СБ служит эффективной матрицей для эпитаксиального роста наблюдаемых наноструктур. Изменение жесткости приповерхностного нанослоя, как показывают измерения, коррелирует с морфологией поверхности (рис.17): вершинам соответствует меньшая жесткость, впадинам – большая. Проведено экспериментальное исследование эжекционных (вторичных) частиц, возникающих при высокоскоростном взаимодействии ударника с тонкими экранами, изготовленными из различных конструкционных материалов. Схема эксперимента показана на рис.18. Тестировались материалы, которые используются как элемент конструкции защитного экрана космического аппарата (КА), или рассматриваются как перспективные материалы для этой цели: алюминиевые пластины, стальные сетки или стопки сеток, неметаллические пластины из композитных материалов. Алюминиевый ударник имел диаметр 6.35 мм. Скорости воздействия были от 2.0 до 3.5 км/сек. В экспериментах для улавливания эжекционных частиц использовались низкоплотные коллекторы из пенополистирола или наборы тонких алюминиевых фольг. По результатам экспериментов были сделаны следующие выводы:

- 1) В экспериментах с алюминиевыми пластинами, материал в эжекте распределен крайне неоднородно, формируя узкие потоки частиц, которые образуют конус. Углы наклона эжекционного конуса имеют значительную дисперсию и зависят от толщины пластины.
- 2) Общая масса эжекционных частиц, полученная в экспериментах с алюминиевыми пластинами, зависит от толщины пластины и существенно превышает общую массу эжекционных частиц, полученную в экспериментах со стальной сеткой той же удельной массы, что и пластина (рис.19).
- 3) Эксперименты с композитными пластинами, изготовленными из высокопрочного стеклопластика, показали, что пробивная способность эжекционных частиц низка: ~90% частиц не способны пробить первую алюминиевую фольгу коллектора толщиной 0.06 мм; общее же число эжекционных частиц, получаемых в эксперименте со стеклопластиковыми пластинами, велико по сравнению с подобными экспериментами с алюминиевыми пластинами. Пробивная способность эжекционных частиц существенно выше в экспериментах с алюминиевыми пластинами, чем в экспериментах со стеклопластиковыми.
- 4) Результаты исследования, рассмотренные с точки зрения уменьшения засорения околоземного космоса вторичными частицами, рекомендуют не использовать сплошные алюминиевые пластины в качестве внешней экранной защиты КА от метеороидов и космического мусора.

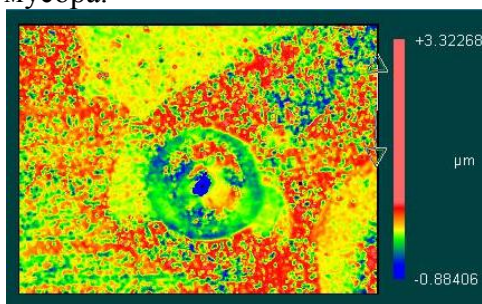


Рис.16(а) Одиночный «стандартный» кратер (синее пятно в центре), окруженный зоной растрескивания, размер которой существенно превышает размер кратера. Размер изображения 0,32мм x 0,24мм.

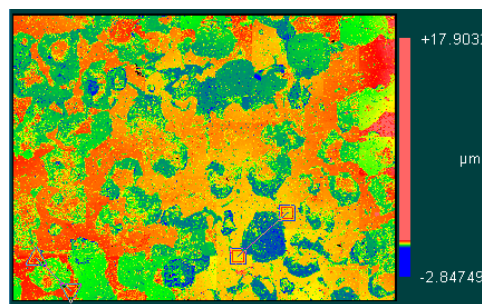


Рис.16(б) Область 2,26мм x 1,7мм с большим количеством плоских кратеров различной формы и глубиной порядка 200-400 нм. Справа рисунка - шкала высот/глубин. Микроскоп NewView 5022



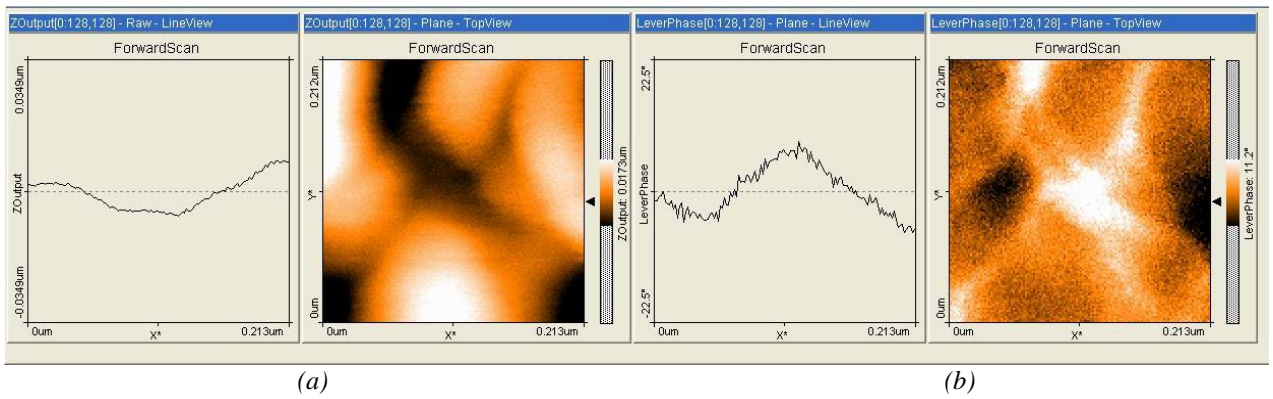


Рис.17. Пространственное ДСМ изображение топографии (а) и фазового контраста (b) поверхности СБ (слева-сечение каждой поверхности), полученное на атомно-силовом микроскопе. Изменение жесткости приповерхностного нанослоя (b) коррелирует с морфологией поверхности (a): вершинам соответствует меньшая жесткость, впадинам – большая. Область сканирования 213 нм x 213 нм x 17 нм.

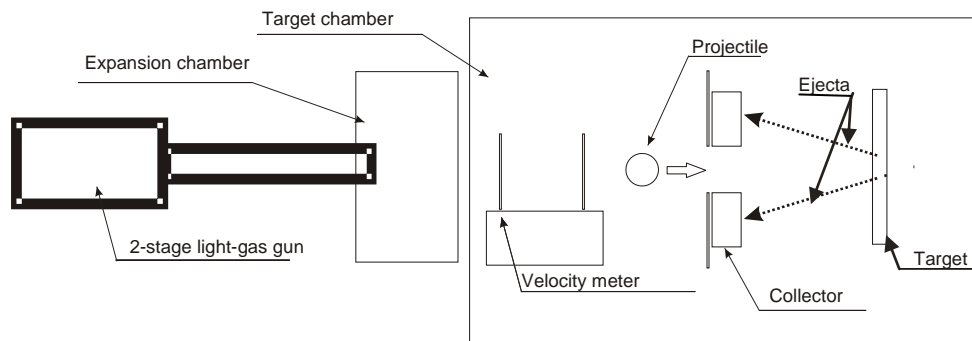


Рис.18 Схема экспериментов по исследованию эжекционных частиц.

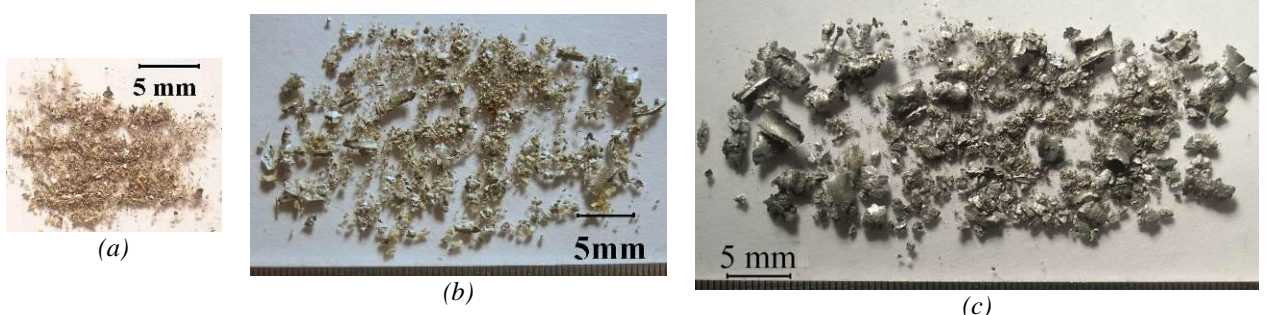
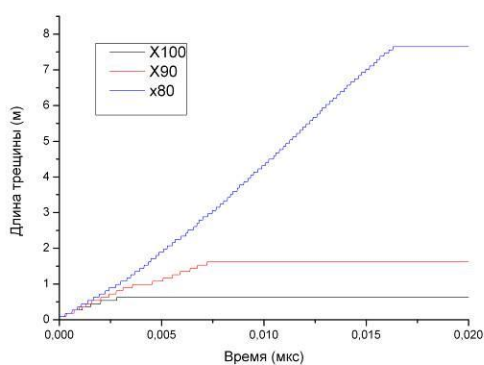


Рис.19 Рисунки демонстрируют зависимость общей массы эжекты от массы экрана и конструкционного материала экрана. Показана эжекта, полученная в экспериментах с: (a) стальным сеточным экраном (2мм x 1мм) удельной массы  $\sim 3.83 \text{ кг/м}^2$ , (b) алюминиевой пластиной толщиной 1.45 мм удельной массы  $\sim 3.88 \text{ кг/м}^2$ , (c) алюминиевой пластиной толщиной 3 мм удельной массы  $\sim 8.1 \text{ кг/м}^2$ . Скорость удара в экспериментах (a) и (b)  $\sim 2.6 \text{ км/сек}$ , (c)  $\sim 2.47 \text{ км/сек}$ .

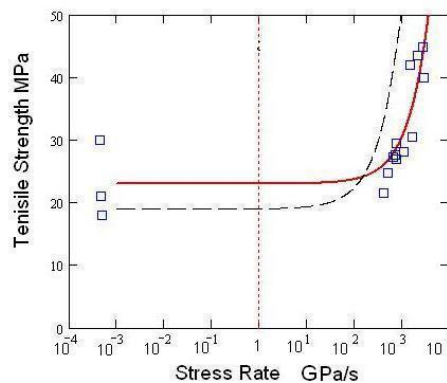
Разработанная атомистическая двухтемпературная модель вещества позволила с единых позиций провести моделирование процессов в плотном разогретом веществе с учётом неравновесной двухтемпературной стадии (температура электронов больше температуры ионов) (Норман Г.Э., ОИВТ РАН, Москва). При описании лазерной абляции/плавления золота (при взаимодействии с фемто- и пикосекундными лазерными импульсами) учёт электронного давления и эффекта зависимости межйонных сил от электронной температуры позволяет достичь хорошего согласия с экспериментальными данными по глубине абляционного кратера. Выделено два основных механизма лазерной абляции: механизм, связанный с релаксацией электронного давления («короткий» тип абляции) и механизм, связанный с распространением ударной волны («длинный»). Модификация поверхности при лазерном облучении возможна при энерговкладах меньших, чем необходимо для возникновения абляции, и происходит вследствие плавления и распро-

странения волн сжатия вдоль поверхности. Исследована двухтемпературная стадия при формировании первичных радиационных дефектов в уране и молибдене под действием осколков деления ядра. Вычислены пороговые энерговклады, соответствующие процессу образования радиационных треков (25 кэВ/нм для U и 140 кэВ/нм - Mo), наблюдавшихся как большое скопление дефектов вдоль пути пролёта иона (осколка деления). С помощью молекулярно-динамического моделирования рассчитаны: 1) скорости зарождения дислокаций в металлах при одноосном сжатии, 2) критические напряжения, необходимые для движения дислокаций в режиме динамического трения, и 3) коэффициенты трения дислокаций. Проанализировано влияние следующих дефектов: вакансий, примесных атомов и зон Гинье-Престона (в сплаве Al-Cu). Анализ рассчитанных на основе МД моделирования температурных зависимостей критических напряжений преодоления зон Гинье-Престона в Al при разных скоростях движения дислокаций позволил выделить термофлуктуационный и динамический (возрастающий с T) вклады в предел текучести. Результаты могут быть использованы в качестве определяющих соотношений для описания пластичности при скоростях деформации более  $10^6$  1/с, достижимых в экспериментах с субпикосекундными лазерными импульсами.

На основе структурно-временной механики разрушения, использующей концепцию инкубационного времени процесса разрушения, разработаны подходы, позволяющие связывать процессы разрушения (включая взаимосвязь прочностных параметров), происходящие на разных масштабных уровнях (Петров Ю.В., ИПМаш РАН, Санкт-Петербург). Разработан нелокальный вариант структурно-временного критерия, являющийся обобщением критерия разрушения на основе инкубационного времени на случай нелинейной механики разрушения. Данный критерий позволяет предсказывать разрушение при развитой пластической зоне (либо зоне поврежденности), развитие которой предшествует процессу разрушения (например, в квазихрупких материалах, таких как бетоны и горные породы, которые отличаются ярко выраженной гетерогенной структурой). На основе разработанных подходов решен ряд задач, решение которых было бы принципиально невозможно без учета факторов масштабного уровня процесса разрушения и развитых зон процесса.



а

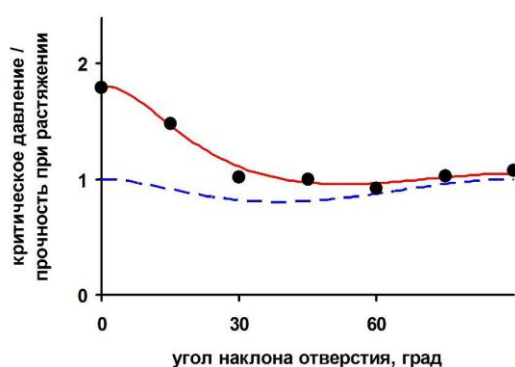


б

Примеры расчетов реальных натуральных экспериментов с использованием разрабатываемого подхода: Распространение трещин в магистральных трубопроводах (а); Зависимость динамической прочности от скорости нагружения в случае ударного разрушения высокопрочных бетонов (б).

С целью проведения экспериментальных исследований в обоснование критериальных подходов к описанию предельных состояний при сложных условиях нагружения разработана методика испытаний и система измерений деформаций при малоцикловом нагружении конструкционных металлических материалов в условиях высокотемпературного нагрева и программируемого цикла деформирования (Романов А.Н., ИМАШ им. Благонравова РАН, Москва). Системы измерения и нагрева для проведения испытаний при циклическом нагружении с визуализацией процессов деформирования и разрушения при-

ближены к эксплуатационным условиям (высокие температуры, двухчастотное нагружение, нагружение с временными выдержками). Для высокотемпературных испытаний при этом используются трубчатые образцы. Нагрев осуществляется нагревателем, расположенным внутри образца. Такая энергоэкономная система нагрева позволяет получать температуру в рабочей зоне образца до 15000С и выше. Кроме того, она открывает свободный доступ к наружной поверхности образца для исследования микроструктуры, измерения температуры и деформаций (размещения деформометра). Установки приспособлены для программных испытаний с выдержками на экстремальных нагрузках в цикле и с наложением нагрузки второй частоты в процессе выдержки. Возможны измерения либо продольных, либо поперечных деформаций. Разработанный метод нагрева с размещением нагревателя внутри трубчатого образца позволил осуществлять металлографические исследования микроструктуры поверхности образца, следить за развитием трещины, перемещением берегов и деформаций в ее вершине, а также размещать специальный деформометр непосредственно на рабочей базе образца и тем самым увеличивать точность получения деформационных характеристик.



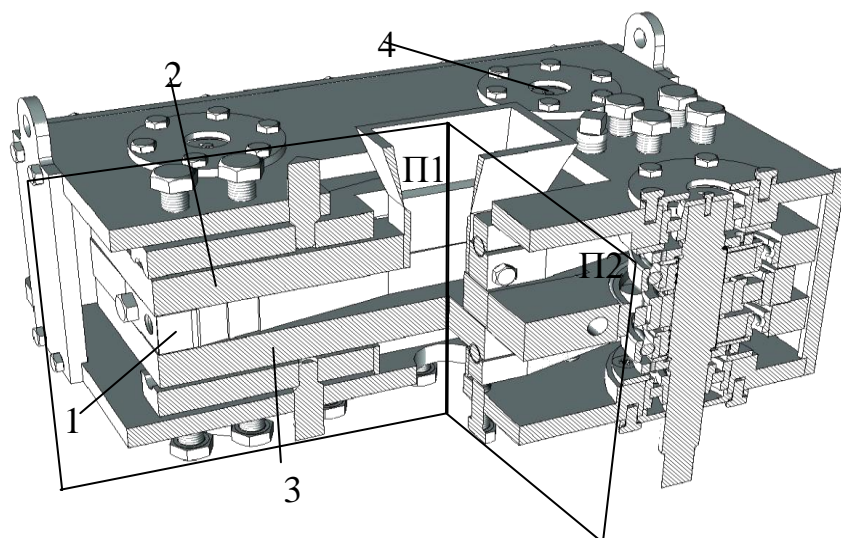
*Зависимость критического давления от направления приложенной нагрузки (сплошная кривая – теоретический расчёт, штриховая кривая – традиционный расчёт, точки – эксперимент)*

В ИГДС СО РАН на основе проведенных экспериментальных и теоретических исследований установлены закономерности разрушения геоматериалов при несимметричном сжатии в зависимости от направления приложенной нагрузки. Выполненные расчёты критического давления по разработанной методике подтверждены полученными экспериментальными данными (Сукнев С.В., ИГДС СО РАН, Якутск). Результаты исследований особенно важны для проектирования горных выработок некругового сечения и оценки их устойчивости.

Рассмотрена задача с неизвестной границей о равновесии упругого тела, содержащего жесткое включение и трещину (Хлуднев А.М., ИГиЛ СО РАН, Новосибирск). На берегах трещины заданы нелинейные краевые условия, гарантирующие взаимное непроникание берегов. Доказано существование такой формы включения, которая максимизирует значение функционала качества. Функционал качества совпадает с производной функционала энергии по длине трещины и, таким образом, связан с критерием разрушения Гриффитса.

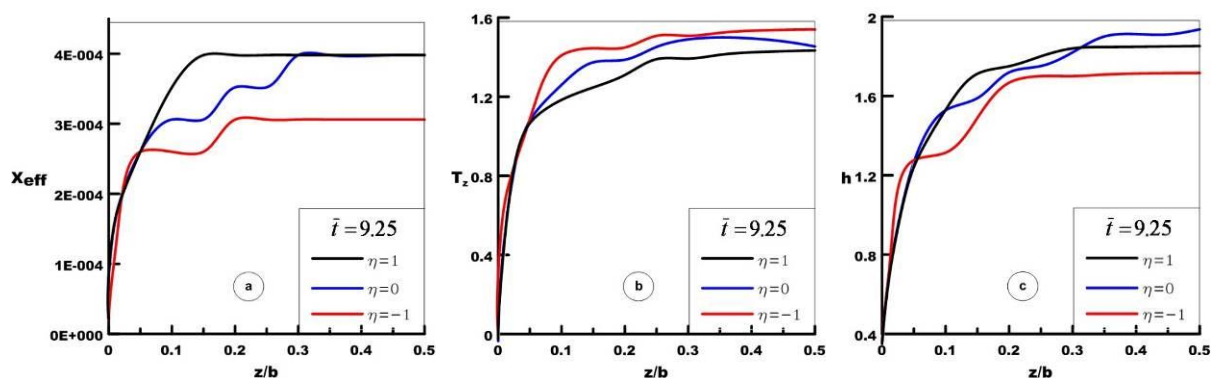
Для установки горизонтального непрерывного литья и деформации металла (УГН-ЛДМ) в среде САD-системы T-Flex построена параметрическая 3D модель устройства (Черномас В.В., Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, Комсомольск-на-Амуре). Из кинематического анализа которой получены данные по траекториям, перемещениям и скоростям характерных точек рабочих поверхностей кристаллизатора УГН-ЛДМ, а также данные об изменении площади контакта между подвижными частями кристаллизатора и формирующимся металлоизделием в зависимости от углов поворота приводных валов устройства. Предложены критерии для оценки предельных значений напряжений, перемещений и степеней деформаций, возникающих в системе «формирующееся металлоизделие – инструмент деформации» при изготовлении металлоизделия обеспечи-

вающих устойчивость совмещенного технологического процесса литья и деформации металла.



Параметрическая 3D модель УГЛДМ. П1 – продольная плоскость симметрии. П2 – поперечная плоскость симметрии. 1 – боковая стенка, 2 – верхняя стенка, 3 – нижняя стенка. 4 – приводной вал.

В рамках концепции зоны процесса разрушения дистанционный критерий разрушения введен через характеристическое (критическое) расстояние, определяемое по минимальному градиенту упруго-пластических напряжений во фронте и на продолжении трещины (Шлянников В.Н., ИЦПЭ КазНЦ РАН, Казань). Данная фундаментальная характеристика, устанавливающая взаимосвязь между процессами, происходящими на различных масштабных уровнях по отношению к параметру структуры материала, будет использована в моделях роста трещины при статическом, длительном статическом и циклическом нагружении. На основе модифицированного метода граничного слоя выполнена серия расчетов параметров стеснения для трехмерного тела конечной толщины. На рисунке представлен эффект влияния вида двухосного нагружения на распределения характеристического расстояния, Tz-фактора и параметра трехосности напряжений по фронту трещины в условиях нормального отрыва.

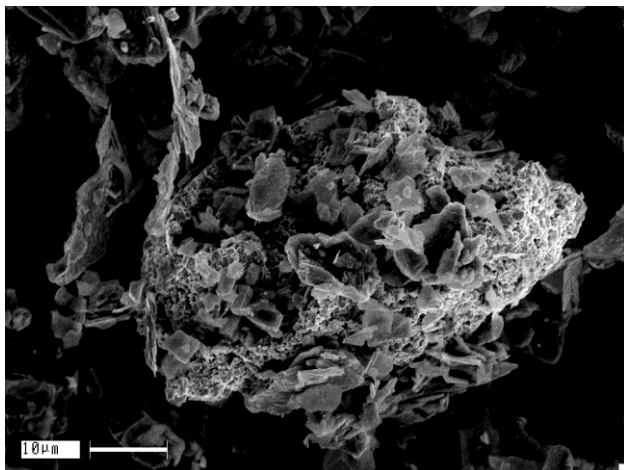


Эффект влияния вида двухосного нагружения на распределения характеристического расстояния, Tz-фактора и параметра трехосности напряжений по фронту трещины в условиях нормального отрыва

Для смешанных форм упруго-пластического деформирования установлен монотонный характер уменьшения критического расстояния при переходе от нормального отрыва к чистому сдвигу. На основе численных расчетов установлены закономерности изменения критического расстояния вдоль фронта трещины в направлении толщины трехмерного тела при двухосном нагружении с учетом времени ползучести. Показаны различия в пове-

дении характеристического расстояния по стадиям деформирования от маломасштабной до развитой ползучести. По критическому расстоянию и параметрам стеснения продемонстрированы особенности выхода трещины на свободную поверхность трехмерного тела.

Исследования показали, что можно наносить детонационным напылением твердосплавные частицы, покрытые твердой смазкой (Штерцер А.А., ИГиЛ СО РАН, Новосибирск). Изучение покрытий WC/Co + MoS<sub>2</sub> позволяет сделать следующие выводы.



Частица WC/Co с налипшими частицами MoS<sub>2</sub>.

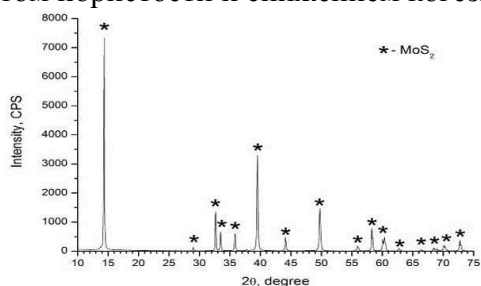
1) Значительное влияние на морфологию покрытия оказывает режим детонационного напыления (количество детонирующего газа на выстрел). С другой стороны, добавление 5 и 10 вес. % дисульфида молибдена в напыляемый порошок WC/Co не влияет на шероховатость поверхности. 2) Остаточный дисульфид молибдена обнаруживается только в покрытиях, нанесенных в очень холодном режиме из порошка с 5 вес. % MoS<sub>2</sub>, и нанесенных в очень холодном и холодном режимах из порошка с 10 вес. % MoS<sub>2</sub>. В покрытиях, наносимых в нормальном режиме MoS<sub>2</sub>

не обнаруживается.

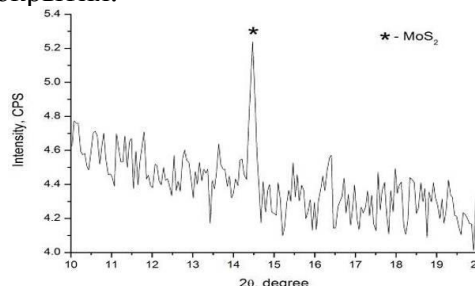
3) Пористость покрытия сильно зависит от режима напыления и составляет 30, 10, и 2 % соответственно для очень холодного, холодного и нормального режима. Добавление дисульфида молибдена (5 и 10 вес.%) в напыляемый порошок не влияет на пористость.

4) Внутри покрытия MoS<sub>2</sub> распределен, в основном, на границах частиц WC/Co. Поэтому рост содержания MoS<sub>2</sub> в напыляемом порошке ведет к снижению когезии между частицами и, вследствие этого, к снижению микротвердости покрытия.

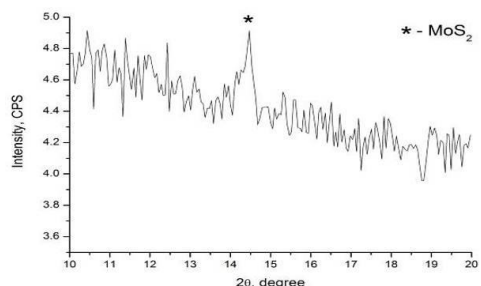
5) Чем холоднее режим напыления, тем меньше микротвердость покрытия. Это связано с ростом пористости и снижением когезии покрытия.



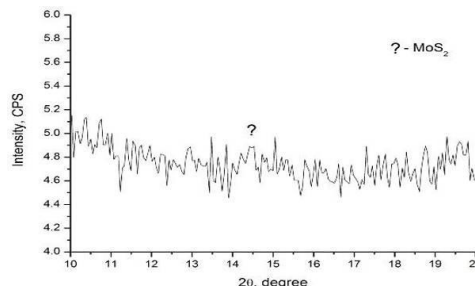
a



b

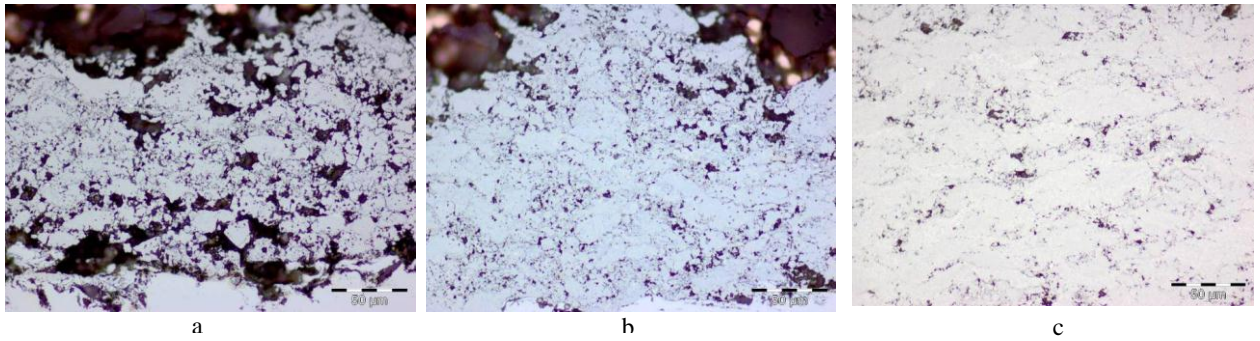


c



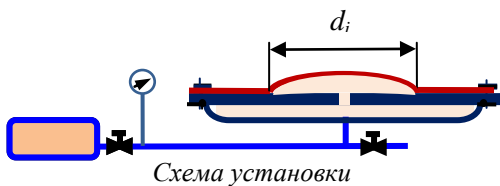
d

XRD диаграмма исходного порошка дисульфида молибдена (a) и прецизионно сканированные XRD диаграммы покрытий, сделанных из порошка, содержащего 10 вес. % MoS<sub>2</sub> в очень холодном (b), холодном (c) и нормальном (d) режимах напыления



Микроструктура покрытий сформированных в очень холодном (а), холодном (b) и нормальном (c) режимах напыления из порошка с 10 вес. % MoS<sub>2</sub>

Разработан двумерный подход к определению адгезии пленки к подложке, позволяющий повысить точность определения адгезионных свойств материалов и снизить разброс получаемых результатов (Якупов Н.М., ИММ КазНЦ РАН, Казань). На разработку получен патент на изобретение РФ №2421707. Новым в способе является то, что формируют отверстие в подложке путем местного удаления материала подложки до покрытия (рис.20). Замеряют изменение диаметра основания купола в процессе отслаивания покрытия. Предполагается, что напряжение по радиусу, начиная от кромки, распределено по параболе четвертого порядка. Произ-



ведя обработку экспериментальных данных по полученным соотношениям, делают заключение о прочности сцепления (адгезии). Повышается точность определения адгезионных свойств материалов и снижается разброс получаемых результатов. При этом исключается повреждение пленок в ходе подготовки и проведения испытаний. Разработка «Способ определения адгезии пленки к подложке» награждена Бронзовой медалью Международного Салона изобретений и инновационных технологий «АРХИМЕД - 2012» (рис.21). Одним из способов снижения уровня концентрации напряжений в дефектных областях элементов конструкций является создание сжимающих усилий. Ранее были рассмотрены «лечение» дефектных областей в виде трещин с использованием специальных тонких накладок, изготовленных из материала с памятью формы, на которые получены патенты на изобретение РФ №№2310791, 2380585. В развитие этих работ методом конечных элементов исследована «панель с дефектом в виде эллиптического выреза» и система «панель с вырезом + активная или пассивная накладка, перекрывающая дефектный участок». Активная накладка, прикрепленная к противоположным берегам дефекта, при нагревании до заданной температуры притягивает берега дефекта друг к другу, снижая уровень концентрации напряжений. Рассмотрены панели с эллиптическим вырезом с отношением полуосей  $a_y/a_x$ : 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 1,0. Установлено влияние толщины накладки, а также уровня деформации в накладке на степень снижения локальных напряжений в дефектной области. На рисунке 3 показано распределение интенсивности напряжений  $\sigma_i$  в панели с эллиптическим вырезом  $a_y/a_x=0,4$  для случаев: а) без накладки  $\sigma_{max} = 7,98$  МПа; б) с пассивной накладкой  $\sigma_{max} = 4,61$  МПа; в) с активной накладкой при оптимальном уровне деформации в накладке  $\sigma_{max} = 1,23$  МПа. Эффективность применения активных накладок очевидна.



Бронзовая медаль «АРХИМЕД - 2012»

Эффективность применения активных накладок очевидна.

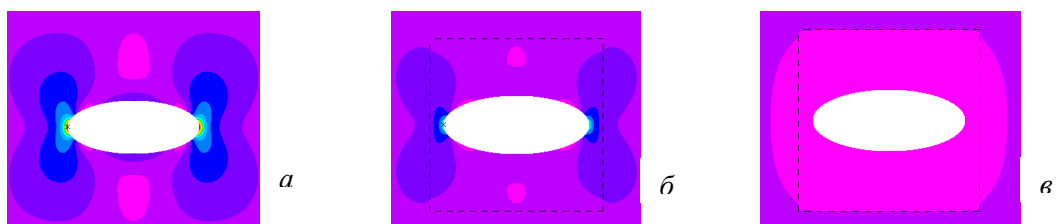


Рис. 22 Распределение  $\sigma_i$  для случаев: а) без накладки; б) и в) с пассивной и активной накладкой

Комплексом численно-аналитических методов от нано- до макромасштаба (квантовая механика (КМ), фрактальный подход, МКЭ, интегральная факторизованная нелинейная модель вязкоупругости) проведено моделирование наномеханических, вязкоупругих, релаксационных и прочностных свойств ряда наноструктурированных полимерных композитов конструкционного назначения – термореактивных (эпоксидных) и эластомерных полимеров, наполненных углеродными нанотрубками (УНТ) и/или углеродо- и кремнийсодержащими частицами (Яновский Ю.Г., ИПРИМ РАН, Москва). Проведен КМ анализ механизмов взаимодействия на наноуровне (кластерный подход) компонентов полимерных композиций, осуществлен компьютерный подбор химических модификаторов поверхности компонентов композитов (матриц и частиц наполнителей), усиливающих прочностные свойства ряда наноструктурированных сред. В частности показано, что наполнение термореактивных полимерных матриц УНТ с открытыми концами приводит к значительному росту прочности материала по сравнению с УНТ с закрытыми концами, вследствие чего в качестве усиливающих наполнителей предпочтительнее использовать короткие УНТ. Установлено, что углеродные нанотрубки большого диаметра также как и многостенные – энергетически более предпочтительны, чем одностенные. Показано, что химическая модификация УНТ должна проводиться по их концам, однако более доступный и эффективный способ увеличения прочности подобных композитов реализуется путем модификации самой композитной матрицы, в частности третичными аминами. В рамках фрактального подхода с использованием модели диффузионно-ограниченной агрегации описаны некоторые важные особенности структурообразования в гетерогенных полимерных композитных средах – например, образование агрегатов и цепочек агрегатов частиц наполнителя. Оригинальный аналитико-численный подход с использованием метода асимптотического усреднения (объемная постановка) позволил оценить влияние геометрических размеров наполнителей на эффективные деформационные характеристики. Численное решение было получено с помощью оригинального программного комплекса МКЭ, разработанного на основе объектно-ориентированного подхода в программировании. Рассчитаны деформационные характеристики эластомерных композитов, наполненных малыми добавками нано- и микроразмерных частиц (до 2 об.%), в зависимости от радиуса включений с учетом свойств контактного (межфазного) слоя. (Параметры последнего вычисляли с использованием фрактальных соотношений на базе данных натуральных экспериментов.) Определены модуль Юнга и объемный модуль среды. Предложенный способ оценки деформационных свойств дает возможность описывать эффект усиления композитов при уменьшении размеров частиц наполнителя от микро- до наноразмерного уровня (25 нм). Предложен оригинальный метод идентификации поведения вязкоупругих релаксирующих композитных сред при конечных деформациях на базе интегральной нелинейной модели, идентификация которой состоит в оценке релаксационного спектра среды в режиме малых деформаций и оценке «демпинг-функции» в режиме конечных деформаций. Построены соотношения для вычисления коэффициентов, характеризующих изменения спектральных характеристик среды с ростом градиента деформации. Предложена аппроксимация выборочной функции нелинейности модели конечным рядом экспонент. Произведена оценка выборочной функции нелинейности методом нелинейной регрессии по минимуму среднеквадратичной ошибки. Получено аналитическое выражение «демпинг-функции» в интегральном нелинейном уравнении вязкоупругости. Оценка «демпинг-функции» по экспериментальным данным производилась с помощью нелинейной регрессии по минимуму среднеквадратичной ошибки с внедрением алгоритма регуляризации задачи. Адекватность предлагаемого метода идентификации проверена в натуральных экспериментах с реальной вязкоупругой средой – эластомерным невулканизированным композитом на основе матрицы из натурального каучука, наполненной техническим углеродом.

## Направление 4: Развитие моделей континуальной и дискретной механики для описания процессов, при которых происходит нарушение сплошности или изменение структуры материалов – в силу дискретности вещества (наносистемы, гранулированные среды) или в силу особенности происходящих процессов (разрушение, агломерация, структурные и фазовые переходы)

В настоящее время немалое внимание исследователей привлекает проблема структурных превращений и связанных с ними дефектов структуры и повреждений в поле интенсивных пластических деформаций (Аэро Э.Л., ИПМаш РАН, Санкт-Петербург). Предыдущие этапы этого исследования были посвящены развитию существенно нелинейной теории упругих и неупругих микродеформаций на основе модели взаимно проникающих подрешеток. Это даёт возможность рассмотреть такие критические явления как катастрофические деформации, структурные переходы, а также процессы возникновения дефектов в изначально идеальной решетке. Цель настоящего этапа состоит в анализе образования и устойчивости дефектов с учетом взаимодействия макроскопической и микроскопической мод деформаций на локальном уровне (в микромасштабах). Предлагалось также рассмотреть проблему зарождения дефектов при фазовых превращениях типа мартенситных, а также выяснить их влияние на микроструктуру новой фазы. В предлагаемой нелинейной теории кристаллической решетки получаются два уравнения – для акустических и оптических мод соответственно, для полей макроскопических  $U_i$  и микроскопических смещений  $u_i$ . Первое описывает смещения центров кристаллических ячеек - макроскопических элементов масс, как в классической теории сплошной среды. Второе описывает взаимные смещения атомов внутри ячейки - отвечает за изменение ближнего порядка в сложной решетке. Уравнения для нахождения  $U_i$  и  $u_i$  получим вариационным методом, исходя из лагранжиана как периодической функции микросмещений

$$L = \int_0^t \int_V [1/2 \rho \dot{U}_n \dot{U}_n + 1/2 \mu \dot{u}_n \dot{u}_n - 1/2 \lambda_{ikmn} U_{(i,k)} U_{(m,n)} - 1/2 K_{ikmn} u_{i,k} u_{m,n} + (S_{ik} U_{(i,k)} - p)(1 - \cos u_R)] dt dV, \quad (1)$$

$u_R = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}$ . Ясно, что он оказывается инвариантным к сдвигу атомов на целое число периодов. Здесь  $\rho$  – средняя плотность масс атомов,  $\mu$  – приведенная плотность пар атомов. Далее,  $\lambda_{ikmn}$ ,  $K_{ikmn}$  – тензоры коэффициентов упругости и микроупругости, соответственно,  $S_{ik}$  – тензор коэффициентов стрикции, а  $p$  – половина энергии активации жесткого сдвига подрешеток. И, наконец, слагаемое с множителем  $(1 - \cos u_R)$  представляет энергию взаимодействия подрешеток, которая выбрана как периодическая функция микросмещений  $u_R$  с периодом  $2\pi$ . Варьируя лагранжиан по переменным  $U_{(i,k)}, u_{i,k}, u_i$ , получим вариационные уравнения движения макроскопической и микроскопической мод

$$\rho \ddot{U}_i = \sigma_{ik,k}, \quad \sigma_{ik} = \lambda_{ikmn} U_{(km),n} - S_{in} [1 - \cos u_R]_{,n}, \quad (2)$$

$$\mu \ddot{u}_i = K_{ikmn} u_{k,mn} - P l_i \sin u_R, \quad (3)$$



$$l_i = u_i / u_R, \quad P = p - S_{ik} U_{(i,k)}. \quad (4)$$

Здесь запятая в подстрочных индексах означает пространственную производную, заключение их в круглые скобки – симметризацию, точка сверху – производную по времени. Уравнения (2)-(4) это система связанных нелинейных уравнений. Её аналитический анализ можно провести, если рассмотреть статический случай и принять, что деформация плоская. Уравнение (2) для статики будут удовлетворяться, если ввести функцию типа Эйри  $\chi$ :

$$\sigma_{xx} = \chi_{,yy}, \quad \sigma_{yy} = \chi_{,xx}, \quad \sigma_{xy} = -\chi_{,xy}. \quad (5)$$

Уравнения (3)-(4) примут вид

$$0 = K_1 u_{x,xx} + K_{23} u_{y,xy} + K_3 u_{x,yu} - P_1 l_x \sin u + (S_1^2/\lambda_1 + S_2^2/\lambda_2) l_z \sin u \cos u \quad (6)$$

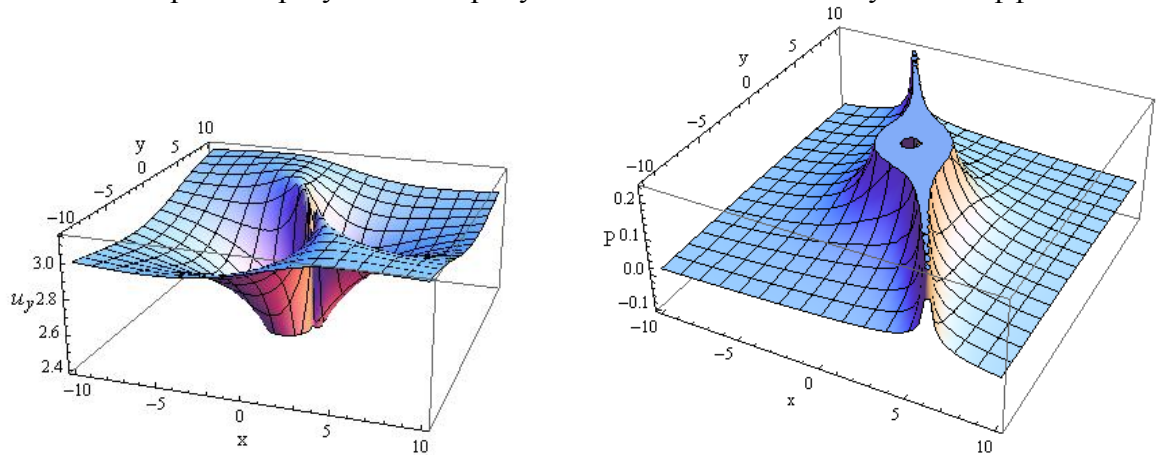
$$0 = K_1 u_{y,yy} + K_{23} u_{x,yx} + K_4 u_{y,xx} - P_2 l_y \sin u + l_y (S_3^2/\lambda_3 + S_4^2/\lambda_4) \sin u \cos u \quad (7)$$

Здесь введено обозначение для эффективной величины межатомных барьеров (половины энергии активации)

$$P_1 = p_1 \beta_1; \quad \beta_1 = (1 - S_1 \sigma_{xx}/p_1 \lambda_1 - S_2 \sigma_{xy}/p_1 \lambda_2); \quad (8)$$

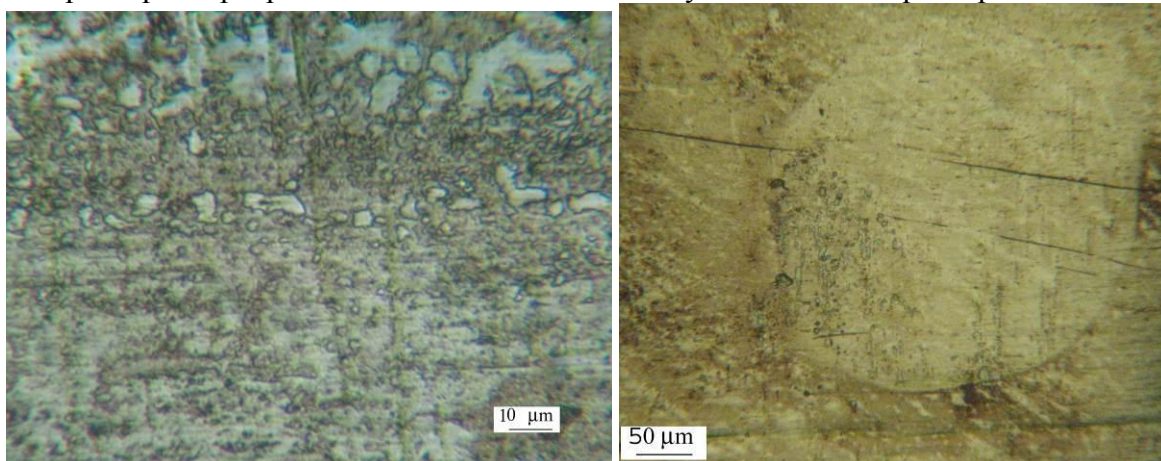
$$P_2 = p_2 \beta_2; \quad \beta_2 = (1 - S_3 \sigma_{xx}/p_s \lambda_3 - S_4 \sigma_{xy}/p_s \lambda_4); \quad (9)$$

Здесь  $\beta_1, \beta_2$  – бифуркационные параметры. Эти уравнения имеют специфические решения типа погранслоя, которые могут описывать приповерхностные явления неподдающиеся трактовке на основе уравнений классической механики сплошной среды. В частности особый интерес представляют задачи интенсивного сжатия мягких сверхтонких слоёв материалов с образованием разрывов (дырок). Современные методы исследования позволяют наблюдать эффекты выдавливания материала с образованием дырок, что представляет практически интересный результат. На рисунках показан соответствующий эффект.



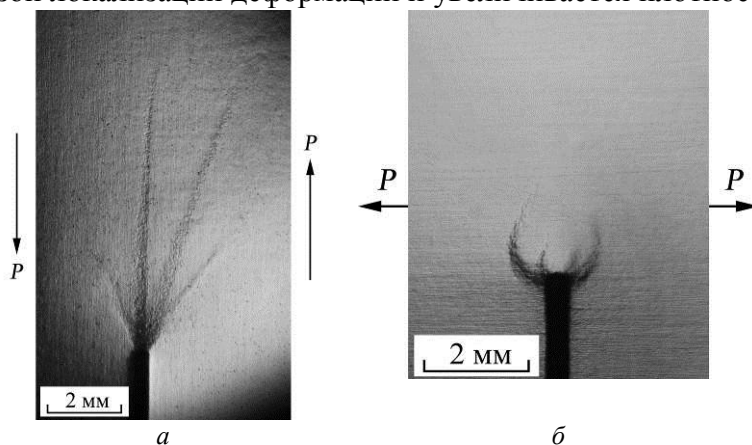
При помощи новых разработанных экспериментальных подходов, обеспечивающих формирование электрических напряжений с амплитудами 30 – 300 кВ, проведено исследование кольцевых образцов из алюминиевого сплава при ударном воздействии магнитно-импульсным методом (Атрошенко С.А., ИПМаш РАН, Санкт-Петербург). Две новые модификации магнитно-импульсного метода позволили сократить период гармонической нагрузки до 7,5 мкс и 1 мкс, при этом напряжение разрушения увеличивается с укорочением длительности нагружения и сокращается количество вязкой составляющей в изломе – образец разрушается более хрупко. Разработаны новые методики электрического взрыва проводников, которые позволили провести исследование металлических стекол на базе Zr в субмикросекундном интервале длительности нагружения (~0,5–0,7 мкс). По результатам измерений в ходе эксперимента и микроскопического изучения структуры материалов впервые обнаружено появление областей рекристаллизации в аморфном материале

ZrNiCuAl. С увеличением процента рекристаллизованной структуры уменьшается средний размер зон рекристаллизации и наблюдается увеличение микротвердости.



Области рекристаллизации в ZrNiCuAl после ударного нагружения

Проведены испытания плоских образцов с краевым надрезом из малоуглеродистой стали различной толщины в условиях нормального отрыва и поперечного сдвига, оценены значения коэффициентов интенсивности напряжений ( $K_I$  и  $K_{II}$ ), размеры пластических зон, плотность микротрещин на различных стадиях нагружения, параметры акустической эмиссии и скорости продольных ультразвуковых волн (Ботвина Л.Р., ИМЕТ РАН, Москва). Установлено, что в условиях поперечного сдвига кардинально меняется форма зон локализации деформации и увеличивается плотность микротрещин в зонах.



Зоны пластической деформации в вершине надреза образцов толщиной 8 мм из малоуглеродистой стали в условиях сдвига (а) и в условиях отрыва (б)

Оценка параметров АЭ в процессе испытания образцов разной толщины (2 и 8 мм) показала, что в условиях сдвига вне зависимости от толщины образца увеличивается число сигналов АЭ и их интенсивность вследствие увеличения поврежденности материала образца. С увеличением толщины образца значительно снижается  $b$  – параметр (модуль тангенса угла наклона прямой, полученной путем линейной аппроксимации амплитудного распределения

сигналов акустической эмиссии методом наименьших квадратов), характеризующий влияние высокоамплитудных сигналов (см. таблицу).

№ образца	Толщина, мм	Тип нагружения	$b$	$\sum N_{АЭ}$	$V_{I\text{ ср}}$ , м/с	$K_{II}/K_I$
41	8	сдвиг	0,65	52869	5552	0,547
42	8	отрыв	1,13	2786	6241	
46	2	сдвиг	1,77	1485		0,549
47	2	отрыв	1,43	1055	5855	

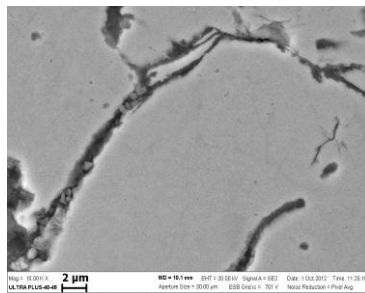
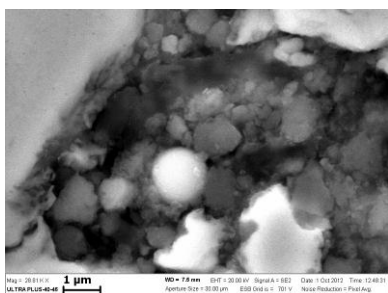
Обнаружена обратная взаимосвязь параметров акустической эмиссии с данными измерений скорости продольных ультразвуковых волн ( $V_I$ ). Установлено, что  $V_I$ , а, следовательно, и модуль Юнга в образце, испытанным на сдвиг, меньше, чем на отрыв. Это обусловлено большей поврежденностью образцов после испытания на сдвиг. С уменьшением

толщины сдвигового образца  $V_I$  уменьшается вследствие увеличения поврежденности. Сдвиг приводит к уменьшению значений КИН. Отношение  $K_{II}/K_I$  составляет  $\sim 0,5$  и не зависит от толщины образца в исследованных пределах ее изменения. Коэффициент стесненности пластической деформации, оцененный по соотношению Ирвина и измеренным значениям пластической зоны и КИН, снижается в условиях сдвига.

Эксперименты по обоснованию откольной природы локализации деформации проведены в условиях одномерного нагружения и в режиме коллапса толстостенной трубы (Буравова С.Н., ИСМАН, г. Черноголовка). Температуры ударного сжатия в обоих вариантах близки, но деформированное состояние материала различно. Полосы сдвига являются продолжением откольных трещин, т.е. являются результатом интерференции волн разгрузки, в зоне растяжения которой величина отрицательных напряжений не превышает динамической прочности материала. Полосы возникают на стадии разгрузки, поэтому деформированное состояние материала не является необходимым для образования полос локализованной деформации. В сталях образование откольной трещины сопровождается полиморфным переходом.



Экстраполяция температуры ударного сжатия к отрицательным давлениям показывает, что образование полос сдвига имеет место при температурах, близких к комнатной. К такому же выводу пришли в работе [D. Rittel, Phys. Rev. Lett. 101, 165501 (2008)].

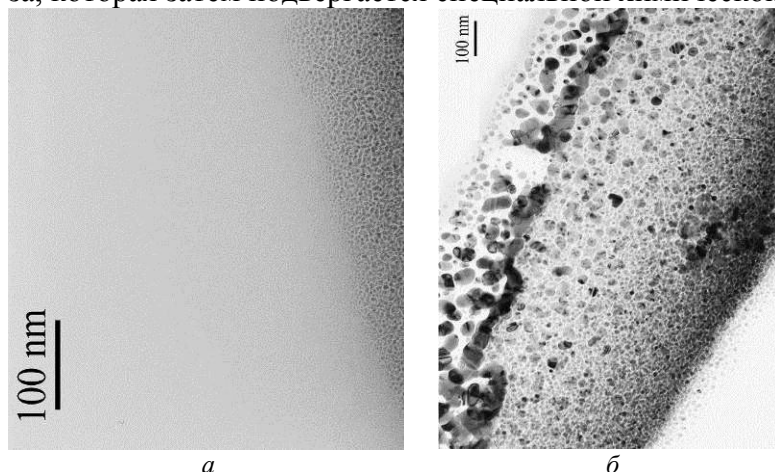


Структурные исследования перехода от несплошности материала к полосам сдвига показали наличие цепочки пор, заполненных осколками материала и мелкими округлыми образованиями, предположительно зародышами начала рекристаллизации. Изменение

состояния кристаллической решетки под влиянием деформации при тепловом или механическом воздействии эквивалентны, взаимозаменяемы с позиций реакции кристаллической решетки. Процессы, приписываемые нагреву при необратимой пластической деформации, объяснимы откольной моделью локализации. Вопрос о поведении материала при отрицательных давлениях остается мало изученным и требует всестороннего изучения.

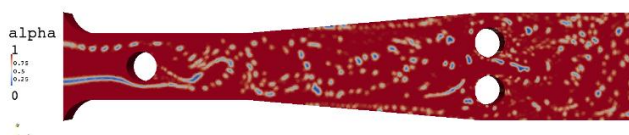
Целью проведенных исследований являлось выяснение возможных механизмов образования наноалмазов (НА) и аламазоподобных структур при гидродинамической кавитации в углеродсодержащей жидкости для отработки управления синтезом (Галимов Э.М., ГЕОХИ РАН, Москва). Как показали проведенные эксперименты, при вариации молекулярной структуры развиваемый метод позволяет получать НА различных размеров и типов кристаллической решетки. При быстром движении химически чистого толуола ( $C_6H_5CH_3$ ) по профилированному каналу в виде сопла Вентури, в жидкости формируются кавитационные полости, которые затем сжимаются в рабочей камере при резком скачке внешнего давления. Давление в ударной волне, достигающее значений 80 – 90 МПа, обеспечивает близкий к адиабатическому сжатию коллапс кавитационных пузырьков. В ре-

зультате ряда быстропротекающих физико-химических процессов испарения, нагрева и термической диссоциации паров толуола, в полости синтезируется твердая углеродная фаза, которая затем подвергается специальной химической обработке.

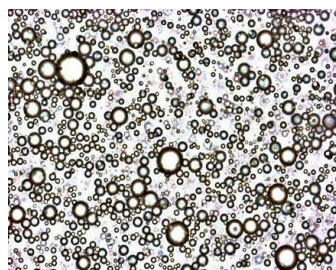
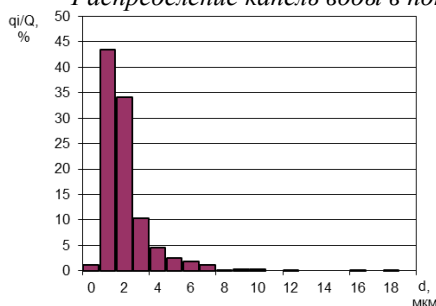


Полученный материал исследовался на просвечивающем электронном микроскопе JEM100CX11 в ИФТТ РАН. На рисунке показаны фотографии образцов кавитационных наноалмазов из толуола (а) и бензола (б). На фотографиях видно, что оба вида алмазов представляют собой агломераты частиц нанометрового размера. Размер алмазов из толуола намного меньше и

составляет по нашим оценкам 2-5 нм, в то время как кавитационные алмазы из бензола представляют собой частицы размером 20-30 нм. Анализ электронограмм наночастиц из толуола подтвердил наличие двух различных кристаллических фаз – с алмазной (пространственная группа Fd3m) и ГЦК решеткой (пространственная группа Fm3m).



Результат моделирования двухкомпонентного потока.  
Распределение капель воды в потоке нефти



Микрофотография водо-масляной эмульсии (4 %) и диаграмма распределения капель масла по размеру

лизуляции потока в гомогенизаторе. На основании полученных данных была установлена зависимость дисперсности капель эмульсии от режима течения, формы и размера тел обтекания, их взаиморасположения и прочих конструктивных параметров. Было показано, что, подобрав соответствующий режим работы гомогенизатора, можно обеспечить получение эмульсии с заданным распределением дисперсности капель в диапазоне от 2 до 20 мкм. Были проведены поисковые лабораторные исследования и сформулированы рекомендации о возможности промышленного применения предлагаемой волновой технологии для решения таких технологических задач как:

- 1) эмульгирование мазута для приготовления водо-топливных эмульсий;
- 2) рафинация, депарафинизация и очистка неочищенных растительных масел;
- 3) интенсификация технологического процесса обессоливания нефти.

Разработана математическая модель турбулентного течения двухкомпонентной жидкости в проточном гомогенизаторе на основе концепции «крупных вихрей» (Ганиев Р.Ф., НЦ НВМТ РАН, Москва). Проведены расчеты, на основе которых были определены условия эффективного диспергирования жидкости и оптимальные конструкционные параметры гомогенизатора. Был создан гидродинамический стенд для проведения экспериментальных исследований, на котором были испытаны несколько вариантов конструкций гомогенизатора с телами обтекания различной формы и размеров. Были выполнены эксперименты по визуализации потока в гомогенизаторе.

Была предложена конструкция проточного гомогенизатора для получения тонкодисперсных эмульсий и высокостабильных смесей жидкости. Гомогенизатор представляет собой плоский канал с установленными в нём телами обтекания. Диспергирование эмульсий происходит благодаря появлению областей кавитации за телами обтекания. Схлопывание многочисленных кавитационных пузырьков порождает ударные импульсы значительной амплитуды, вызывающих разрушение капель эмульсии.

Проводятся исследования многомасштабных процессов в двух направлениях. Первое направление связано с формулировкой математической и численной моделей описания процессов кристаллизации металлических расплавов на основе термодинамически согласованных моделей формирования структур в пористых средах и модели описания тонких структур фазовых переходов на масштабах локального равновесия (Жуков В.Т, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва). Построенные модели имеют исключительно важное значение при создании новых материалов. Второе направление связано с созданием специальной термодинамической модели, описывающей фазовые переходы в двухфазных системах и позволяющей рассчитывать эти явления «сквозным способом». А именно, на примере уравнения состояния Ван-дер-Ваальса определяются зависимости давления и температуры от плотности и внутренней энергии; при этом в области энергий и плотностей, попадающих в зону фазового перехода, применяется специальная аппроксимация, которая может учитывать неравновесные процессы. Далее решаются одномерные уравнения Эйлера с правой частью и с уравнением состояния, описываемым упомянутой выше термодинамикой. Продемонстрирована работоспособность указанной модели. Дальнейшее развитие предполагает учет теплопроводности, многомерную реализацию и использование для прямого моделирования двухфазных смесей, включая фазовые переходы, на многопроцессорных вычислительных комплексах высокой производительности. Также предполагается уточнение термодинамической модели. Третье направление связано с разработкой алгоритмов и программ для ультрапараллельных суперкомпьютеров с целью обеспечения расчетных экспериментов в вышеуказанных направлениях.

Водород – это один из самых распространенных элементов на планете (Индейцев Д.А., ИПМаш РАН, Санкт-Петербург). В металлах и других твердых материалах водород находится в ловушках различной природы. В зависимости от характера распределения водорода по ловушкам и его концентрации материал приобретает определенные свойства. В конструкционных материалах, таких как сталь и алюминий, наличие водорода негативно сказывается на механических свойствах. Большое влияние на распределение водорода в материале оказывает не только насыщение из внешней среды, но и распределение механических напряжений по материалу. В процессе механического нагружения материала водород диффундирует в область растягивающих напряжений (эффект Горского). При циклическом нагружении материала наблюдается накопление водорода в зонах максимальных напряжений. Этот эффект связан с тем, что в процессе нагружения происходит перераспределение водорода по энергиям связи. При циклических нагрузках объемное перераспределение водорода приводит к увеличению его концентрации в областях разрушения. В областях, прилегающих к областям разрушения, напротив, концентрация водорода уменьшается. При одноосном циклическом нагружении распределение концентрации водорода вдоль металлического образца имеет ярко выраженный многоэкстремальный характер с одним основным пиком. Изучение потока примеси, вызванного внутренними напряжениями в дополнение к диффузионному, было начато в работах В.С.Горского. Однако замкнутой математической модели переноса примеси не было создано. Перенос примеси выражался через параметры микроскопической модели или с помощью неизвестных внутренних сил, действующих на атомы примеси. В рамках данного этапа предложена модель, описывающая наблюдаемое явление, и приведена замкнутая система связанных

уравнений переноса водорода при деформации тела, вытекающая из общих законов механики сплошной среды. На этой основе выведено обобщенное уравнение диффузии. Показано, что учет взаимных связей диффузии и деформации важен при изучении процессов, сопровождающихся вибрацией и чередующимися циклами нагружения-разгрузки материала с примесью. При нестационарном деформировании тела перераспределение водорода может быть направлено против энтропийного потока диффузии, вызывать локализацию водорода и, как результат, необратимое ухудшение механических свойств материала, например, охрупчивание и разрушение металла в местах концентрации в нем диффузионно-подвижного водорода. Учет взаимное влияния диффузии и деформации актуален в изучении процессов, которые сопровождаются вибрационным или циклическим нагружением материалов, содержащих водород. При нестационарной деформации твердого тела движение водорода может быть направлено против диффузионного потока. Это приводит к водородной локализации и, как следствие, к необратимому ухудшению механических свойств материала, например, охрупчиванию и разрушению металла в местах аккумуляции диффузионно-подвижного водорода. В качестве приложения предложенной модели рассмотрено явление локализации примеси при циклическом нагружении стержня из сплава алюминий-медь-свинец. Результаты расчетов согласуются с экспериментальными результатами по исследованию перераспределения водорода при циклическом деформировании металлических образцов из сплава алюминий-медь-свинец.

Развиты подходы для описания физико-механических процессов в средах, для которых необходим учет влияния внутренней структуры на их физико-механические свойства или в которых протекают процессы, существенно изменяющие внутреннюю структуру (Кривцов А. М., ИПМаш РАН, Санкт-Петербург). В рамках этого направления решены следующие задачи. На основе атомистического подхода построена теория для описания устойчивости при конечных деформациях и структурных переходах применительно к различным типам кристаллических твердых тел; определен критерий устойчивости, правомерность которого подтверждена вычислительным экспериментом. В ходе исследования устойчивости ГЦК решетки при больших деформациях выявлено два типа структурных переходов: ГЦК – ОЦК при сжатии вдоль осей кубической симметрии, ГЦК – ГЦК при добавлении сдвиговых деформаций. Результаты могут быть использованы для построения критериев разрушения, а также как для трактовки уже имеющихся экспериментальных данных, например, в области создания новых конструкционных материалов, так и для предсказания поведения материалов при приближении к границе устойчивости. На основе учета моментного взаимодействия разработана модель, с единых позиций описывающая упругие свойства широкого класса ковалентных кристаллов. В рамках модели выведены выражения для тензора жесткости, получены соотношения, связывающие макроскопические модули упругости с микропараметрами продольной и поперечной жесткости межатомных связей. Предложенная модель применена к описанию упругих свойств кристаллов с решетками алмаза и сфалерита, определены значения продольной и поперечной жесткости межатомных связей. Показано, что для смешанных связей предложенная модель позволяет оценить степень ковалентности связи без внесения каких-либо поправочных слагаемых в формулы. Разработана модель, основанная на применении частиц с вращательными степенями свободы, для описания деформирования и разрушения гранулированных твердых тел (керамики, горных пород, бетона, нанокompозитов, агломератов и т.д.), описывающая все виды упругого деформирования связи (растяжение, сжатие, изгиб, кручение) и ее разрушения, при этом модель позволяет явно задавать все упругие свойства связей между частицами. Показано, что в отличие от существующих аналогов предложенная модель позволяет с единых позиций описывать не только гранулированные трехмерные тела, но также и дискретные стержни и оболочки (Рис.1).

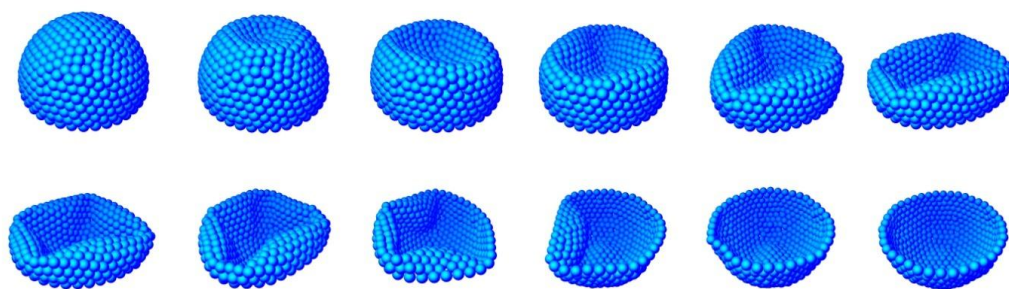


Рис. 1. Моделирование выворачивания дискретной полусферической оболочки

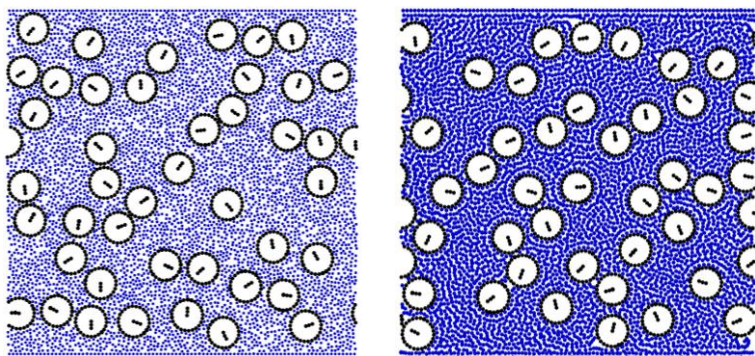


Рис.2. Течение жидкости, содержащей частицы в тонком канале. Сравнение результатов моделирования методами динамики частиц (слева) и гидродинамики сглаженных частиц (справа).

методами гидродинамики сглаженных частиц, молекулярной динамики и дискретных элементов (Рис.2), исследовано влияние концентрации пропанта на реологические свойства смеси. Построена механическая компонента гео-химико-механической модели образования системы Земля-Луна. Модель легла в основу новой концепции ранней эволюции данной системы, основанной на сравнительном анализе геохимического состава космических тел и результатах динамического моделирования методом частиц ротационного коллапса газопылевого облака с образованием зародышей Земли и Луны, проведенного в широком диапазоне физико-механических параметров на суперкомпьютерах.

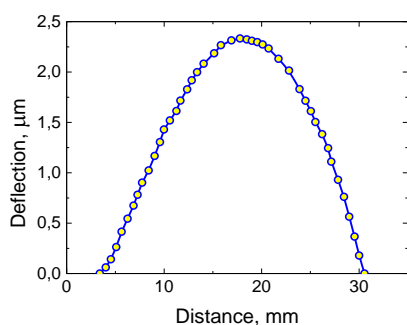


Рис. 3 Отклонение поверхности пленки SiC от горизонтали, вызванное упругими напряжениями

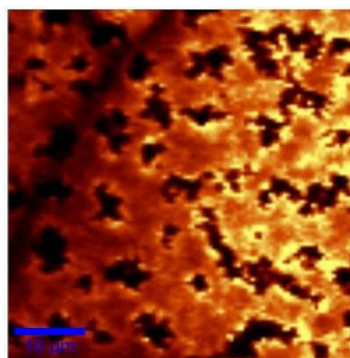


Рис.4 Пространственное распределение упругих напряжений в пленках AlN на SiC/Si.

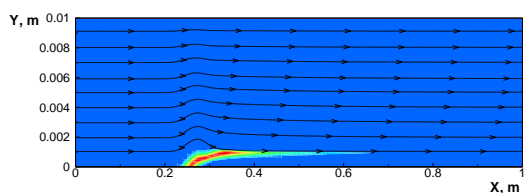
мнии (Кукушкин С. А. ИПМаш РАН, Санкт-Петербург). Впервые релаксация упругой энергии обеспечивается с помощью взаимодействия точечных дефектов в кубических кристаллах, которые образуют ансамбль дилатационных диполей. Разработана теоретическая модель зарождения и роста новой многокомпонентной фазы в твердых телах в процессе химических превращений с учетом механических напряжений, возникающих из-за разницы в плотностях образующейся и материнской фаз. Выполнен цикл эксперимен-

Построена дискретная модель для описания гидроразрыва пласта, основанная на применении метода динамики частиц, и проведено моделирование множественного трещинообразования при гидроразрыве в низкопроницаемых коллекторах с целью повышения рентабельности нефтяных скважин. Разработана методика связанного моделирования динамики частиц пропанта в трещинах гидроразрыва

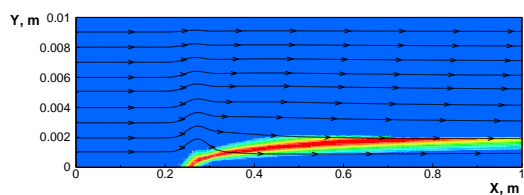
На основе теоретических и экспериментальных исследований упругого взаимодействия микродефектов структуры в кристаллах с кубической симметрией разработана методика осаждения низкодефектных тонких пленок, в частности, карбида кремния на крем-

тальных исследований по механизму релаксации и распределению упругих напряжений по поверхности подложки при росте тонких пленок с большим несоответствием решеток. В частности, измерены величины упругих напряжений в эпитаксиальных пленках карбида кремния с параметром решетки 0.436 нм на кремнии с параметром решетки 0.543 нм. Показано, что взаимодействие точечных дефектов может не только привести к релаксации упругой энергии, но даже изменить ее знак в некоторых случаях. Например, на Рис.3 показано отклонение поверхности пленки SiC от горизонтали, измеренное измерителем упругих напряжений FLX-2320-S и соответствующее величине напряжений 0.5 Гпа (при классической эпитаксии оно должно быть вогнутым и соответствовать гораздо большему напряжению). На Рис. 4 изображено пространственное распределение упругих напряжений в пленках AlN на SiC/Si (полученное рамановским конфокальным микроскопом), создаваемое дилатационными диполями (светлые поля – наибольшее напряжение, темные поля – наименьшее).

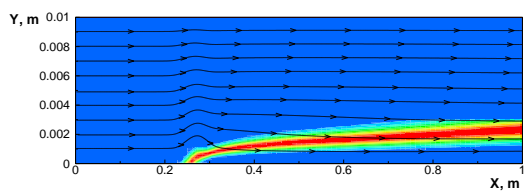
Рассмотрена задача о численном моделировании расслоенного режима течения двух вязких жидкостей с деформируемой границей раздела в неоднородном температурном поле (Урманчиев С.Ф., Институт механики УНЦ РАН). Предполагалось, что одна из жидкостей является полимеризующейся и имеет немонотонную зависимость вязкости от температуры. Изучены основные закономерности течения слоя аномально-термовязкой жидкости в канале теплообменника при диапазоне изменения температуры, охватывающем аномальную зону немонотонной зависимости вязкости исследуемой жидкости от температуры. В результате численных экспериментов установлены причины наблюдавшегося в лабораторных опытах «порога», как локализованной деформации на границе раздела двух жидкостей. Выявлено влияние толщины слоя термовязкой жидкости (Рис. 5) и интенсивности теплообмена через стенки канала (Рис. 6) на величину и форму «порога». Полученные результаты необходимы для прогнозирования поведения полимеризующихся сред, таких как жидкая сера. С практической точки зрения принципиальное значение имеют выводы, касающиеся определения оптимального теплового режима теплообменников на стадии проектирования.



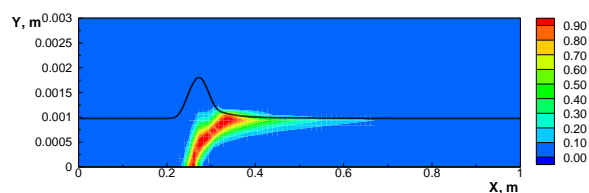
а)  $h_1 = 0.001$  м



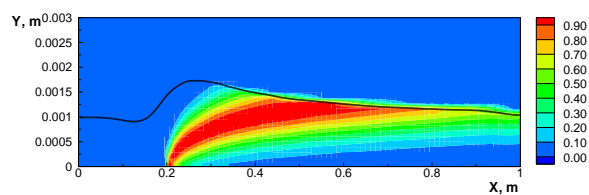
б)  $h_1 = 0.002$  м



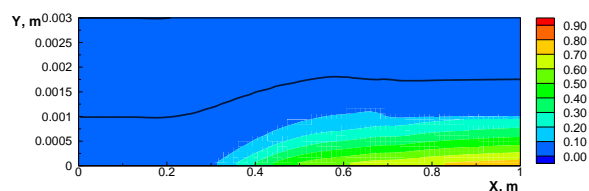
в)  $h_1 = 0.003$  м



а)  $Bi \rightarrow \infty$



б)  $Bi = 10$



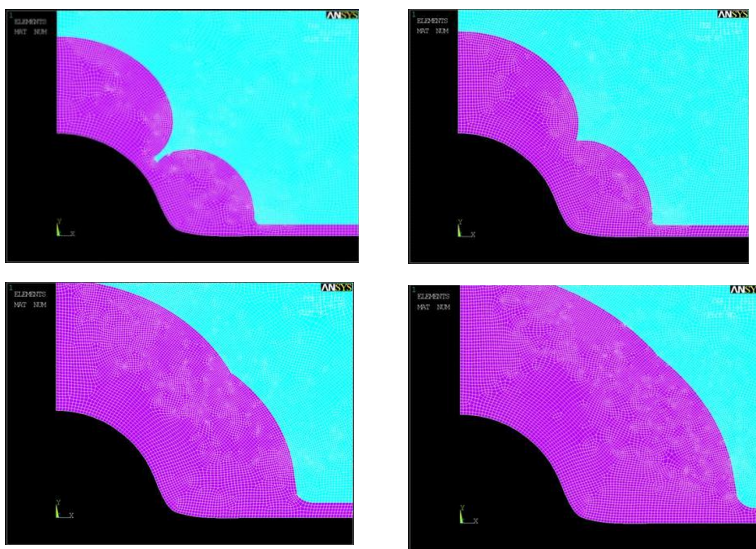
в)  $Bi = 2$

Рис. 5. Линии тока и вязкий барьер при различной толщине слое аномальной жидкости

Рис. 6. Установившееся положение границы раздела и изолинии вязкости при различных условиях теплообмена



Межфазные границы и фронты химических реакций в деформируемом теле рассмотрены как поверхности разрыва деформаций, для которых формулируется кинетическое уравнение, связывающее скорость границы с термодинамической (конфигурационной) силой (Фрейдин А.Б., ИПМаш РАН, Санкт-Петербург). В случае межфазной границы в роли этой силы выступает скачок нормальной компоненты тензора напряжений Эшелби



*Формирования щелеобразной конфигурации зоны оксида в окрестности выточки*

реакция типа реакции окисления кремния или реакции образования металл-гидридов. Реакция локализована на фронте реакции и поддерживается диффузией окисляющего газа (или водорода) через сформировавшийся оксид (или гидрид). Показано, что вклад деформируемых компонент химической реакции в тензор химического сродства определяется тензорами химических потенциалов (тензорами напряжений Эшелби), определяемых относительно ненапряженных конфигураций исходного материала и оксида (гидрида), умноженных на параметры химической реакции (молярные массы и стехиометрические коэффициенты) – аналогично скалярному варианту классической теории химических реакций. Полученное выражение для тензора химического сродства позволило сформулировать кинетическое уравнение, определяющее скорость продвижения фронта химической реакции как функцию нормальных компонент тензора сродства. В результате была поставлена связанная краевая задача механохимии, в которой скорость фронта определяется как чисто химическими факторами, так и напряжениями, а напряжения в свою очередь зависят от формы и положения фронта. Получены аналитические решения простейших модельных задач. Развита процедура конечно-элементного моделирования. Проведены численные эксперименты, демонстрирующие развитие фронта химических реакций в окрестности концентраторов напряжений. Продemonстрировано влияние знака напряжений (растяжение/сжатие) на кинетику фронта реакции. Обнаружен эффект блокирования реакции внутренними и внешними напряжениями.

Комплексом физико-механических методов (атомно-силовая микроскопия (режимы фазового контраста и модуляции силы), испытания на наноиндентирование и макропрочность) изучен ряд значимых наноэффектов, связанных с введением в вязкоупругую матрицу наноразмерных наполнителей (явление агрегации, формирование структурного каркаса наполнителя, межфазные структурные эффекты, масштабные эффекты при наноиндентировании) (Яновский Ю.Г., ИПРИМ РАН, Москва). Для описания явления агрегации нанонаполнителя в полимерной среде использовали модель множественного роста кластеров. Для вычисления параметров модели были привлечены натурные данные атомно-

(тензора химического потенциала). В случае фронта химической реакции – тензор химического сродства, выражение которого получено исполнителями проекта. Даны примеры исследования кинетики межфазных границ. Продemonстрированы эффекты смены ориентации и потери устойчивости межфазных границ в зависимости от вида деформированного состояния. На основе использования полученного выражения для тензора химического сродства рассмотрена химическая реакция

силовой микроскопии и соответствующие им распределения фрактальной размерности  $d_f^{ac}$  агрегатов наночастиц в среде полимерной матрицы. Как следует из величин  $d_f^{ac}$  ( $d_f^{ac}=2,40-2,48$ ), агрегаты частиц наполнителя в исследуемых композитах формируются по механизму частица-кластер (Particle-Cluster (P-Cl)) и описываются кластерами модели Виттена-Сандера. Показано, что процесс агрегации в этих системах контролируется диффузионным механизмом. Предложенный подход позволил предсказать конечные параметры агрегатов наночастиц как функцию размеров исходных частиц, их концентрации и других параметров структуры. Проведены оценки фрактальной размерности каркаса частиц наполнителей и интервала самоподобия фрактальных объектов. «Цепочки» наночастиц (агрегатов частиц) образуют в эластомерных композитах физический фрактал в интервале самоподобия ~500-1500 нм. Проведена оценка масштабных эффектов при механических испытаниях методом наноиндентирования. Установлено, что сложная закономерность изменения модуля упругости от величины пластической деформации в экспериментах по наноиндентированию дисперсно-наполненных эластомерных композитов может быть объяснена, в частности, в рамках концепций ангармонизма и флуктуаций плотности. Применение первой из указанных концепций предполагает, что в композитах в процессе наноиндентирования на начальном этапе реализуется деформация, затрагивающая только полимерную матрицу, а переход к микроиндентированию предполагает деформирование композитной среды как гомогенной системы. Вторая из упомянутых концепций показывает, что нано- и микросистемы различаются отсутствием флуктуаций плотности в первых и наличием таковых – во вторых. Это предполагает, что для рассматриваемых композитов флуктуации плотности среды учитывают различие плотностей нанонаполнителя и полимерной матрицы. Установлено, что переход от нано- к микроиндентированию реализуется тогда, когда объем деформированного материала превысит совокупный объем двух агрегатов частиц нанонаполнителя и окружающих их слоев (межфазных слоев) полимерной матрицы. Получены фрактальные соотношения для прогнозирования эффекта усиления. Показано, что фрактальная размерность поверхности частиц (агрегатов частиц) нанонаполнителя  $d_n$  является параметром, контролирующим эффект усиления дисперсно-наполненных композитов. Этот вывод согласуется с известным положением о важной роли поверхностей раздела на границе «полимерная матрица-наполнитель» в наноматериалах, как физической основе изменения их свойств. Величина  $d_n$  определяется размером частиц (агрегатов частиц) нанонаполнителя. Поскольку эффект усиления в большой степени зависит от исходных размеров частиц (агрегатов частиц) нанонаполнителя, он может характеризоваться как истинный наноэффект. Реальное усиливающее воздействие на композитную среду оказывают наночастицы наполнителя, размеры которых составляют менее 52 нм.

## Направление 5: Развитие моделей биомеханики применительно к разработке методов исследования процессов в живых организмах

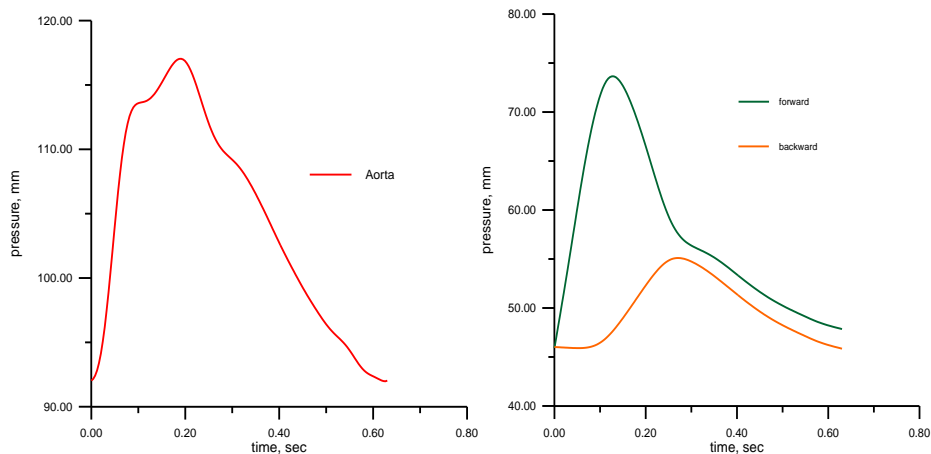


Рис.1 Декомпозиция пульсовой волны в аорте на прямую и обратную волны

Ранняя диагностика развития порока сосудов является одной из главных проблем в профилактике и лечении сердечно-сосудистых заболеваний (Ганиев Р.Ф., ИЦ НВМТ РАН, Москва). Проводимые исследования направлены на разработку диагностического комплекса

с неинвазивным съемом информации о пульсовых явлениях в магистральных артериях на основе апланационной тонометрии и анализа полученных данных методами нелинейных волновых процессов. Предполагается создать аппаратуру нового поколения, позволяющую проводить комплексный анализ пульсовых явлений в различных сегментах артериального русла для определения таких клинически верифицированных показателей как жесткость сосудистой стенки, интенсивность процессов отражения пульсовой волны, скорректированное («истинное») давление в аорте и т.д. Одной из основных проблем математической обработки пульсовой волны является детальный анализ измеренного профиля с целью выделения в сигнале прямой и отраженной волн и определения ряда показателей, характеризующих состояние артериальной системы.

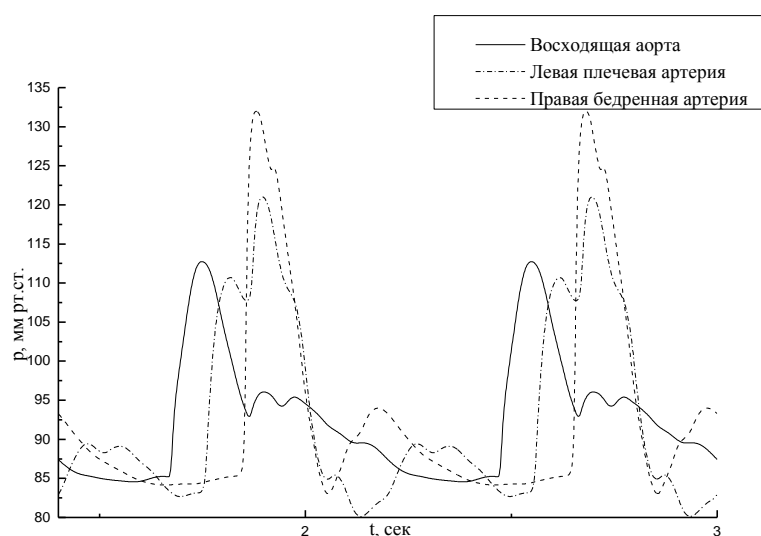


Рис.2. Тестовые результаты компьютерного моделирования зависимости артериального давления от времени в различных артериях.

Разработанная модель обеспечивает новый уровень интерпретации данных, по-

В течение 2012 г. была разработана математическая модель пульсовых явлений в магистральных артериях и в микроциркуляторном звене кровообращения, учитывающая вязкость и нелинейных свойств артерий и сосудов. Использовался современный математический аппарат вейвлет-анализа в сочетании с математическим моделированием волновых процессов в артериальном дереве. Такой подход позволил с большей точностью подойти к проблеме синтеза пульсовой волны в аорте по показаниям измерений в периферийных

лученных в ходе исследований. Была разработана численная методика анализа сфигмографической информации, позволяющая определять основные параметры пульсовых волн. Следующий алгоритм компьютерного анализа пульсовой волны был реализован:

- 1) Первичная обработка сфигмографической информации. Фильтрация исходного сигнала. Разбиение сфигмограммы на отдельные пульсовые волны.
- 2) Расчет отклонений по периоду и амплитуде, масштабирование. Формирование осредненной периферийной пульсовой волны.
- 3) Синтез центральной пульсовой волны в аорте с использованием обобщенных передаточных функций.
- 4) Контурный анализ пульсовой волны. Определение продолжительности выброса, выделение первого и второго систолических пиков. Расчет параметров аугментации.
- 5) Декомпозиция пульсовой волны на прямую и обратную волны. Расчет истинного значения кровяного давления в аорте.

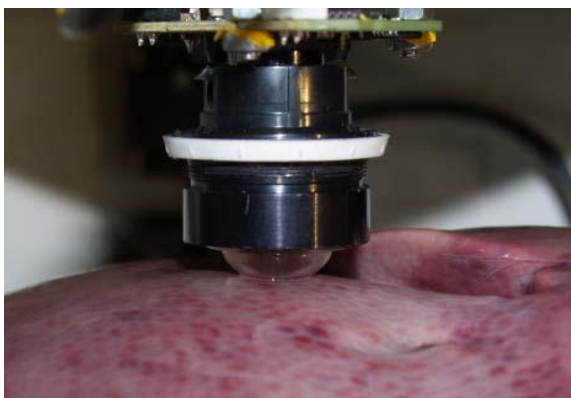


Рис.3 Фрагмент экспериментальной установки

Разработан метод определения механических характеристик биологических тканей на основе математического моделирования и экспериментов по индентированию в мягкую биологическую ткань головки механорецептора, представляющей собой прозрачную силиконовую полую полусферу (Горячева И.Г., ИПМех РАН, Москва). Экспериментально-расчетный метод определения модуля Юнга основан на измерении зависимости площади контакта от нормальной контактной нагрузки в процессе нагружения и моделировании кон-

тактного взаимодействия с использованием метода конечных элементов. Метод был использован для определения модуля Юнга и свежей свиной печени и вареной печени моделирующей циррозную патологию, а также для печени с включением, расположенным на некотором расстоянии от поверхности (рис.3). Изучены кинематические характеристики и напряженное состояние в пястно-запястном суставе большого пальца при различных движениях пальца и приложенных к нему нагрузках. Сустав обладает наибольшей в теле человека вариативностью движений, что позволяет обеспечить широкий спектр различных манипуляций, совершаемых кистью. Дегенерация хрящевой ткани при различных заболеваниях сустава приводит к потере подвижности большого пальца. Это обстоятельство практически лишает кисть нормальной работоспособности, спектр возможных манипуляций кистью сужается. Разработана кинематическая модель, представляющая собой четырехзвенный механизм. Вычисления, по предложенной модели обеспечили достаточно малое отклонение расчетных данных от экспериментальных. Также представлена модель для анализа напряженно-деформированного состояния, возникающего при контактном взаимодействии в пястно-запястном суставе большого пальца при наличии хрящевой ткани различной толщины. Для моделирования костной ткани использовалась модель упругого анизотропного пористого материала. Полученные численные решения контактных задач позволяют провести сравнительный анализ распределения напряжений в костной ткани как при наличии однородной хрящевой прослойки, так и в случае патологии, связанной с уменьшением или отсутствием в некоторых местах хрящевой ткани (рис.4). Анализ вычислений позволяет определять значение нагрузки, приложенной к первой пястной кости, по сближению костей в суставе, определенному по томографическому изображению.

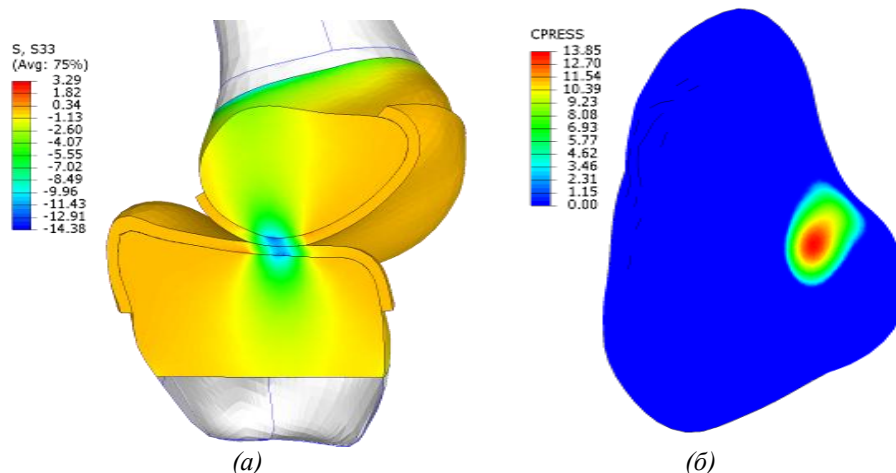


Рис. 4 Распределение сжимающих напряжений  $\sigma_3$  в поперечном сечении сустава (а) и нормальных контактных напряжений на поверхности кости-трапеции (б)

Изучается биомеханика одного типа современных ортезов – ортопедических аппаратов, дающих возможность подтяжки и гибкой подстройки под конкретного пациента в течение всего периода лечения, что позволяет обеспечить лучшую фиксацию и разгрузку проблемной зоны, уменьшить сроки и улучшить качество лечения. Поскольку скорость сращения костей зависит от уровня и программы нагружения конечности, основное внимание сосредоточено на функции разгрузки ортезом пораженной области. На базе ФГУП «ЦИТО» с использованием программно-аппаратного комплекса «ДиаСлед» проведены *in vivo* измерения подошвенных полей давлений для ортезов двух типов и при разной степени бокового обжатия. На основе сравнительных оценок жесткости отдельных элементов системы разработана биомеханическая модель разгрузки конечности при применении туторов, дающая для коэффициента разгрузки теоретическую оценку в диапазоне от 1.5 до 2.3 при отсутствии боковой компрессии, что неплохо согласуется с результатами эксперимента, и линейное падение с ростом обжатия.

Методы съема биопотенциалов с поверхности тела человека относятся к фундаментальной проблеме, связанной с осуществлением тактильного контакта ВОИС с живым организмом или его частями, которое приводит к получению информации, пропорционально возникающему возбуждению или перемещению (Скворчевский А.К., ИМАШ РАН, Москва). С этой целью нами разработаны изготовленные по особой технологии датчики ВОИС, чувствительной частью которых являются встроенные в их чувствительную сердцевину волоконно-оптические брегговские решетки (ВОБР), обладающие способностью преобразовывать свет определенной длины волны пропорционально сенсорному воздействию. Для съема тактильной информации со значительных поверхностей тела человека (плечи, спина, части рук и ног) применяется ВОИС с распределенными параметрами, в которой использованы указанные выше датчики. Отраженные от точечных датчиков сигналы собираются и направляются по общему световоду к демультипликатору, где происходит их разделение. Расположение датчиков ВОБР (рис.6) по тактильным зонам исследуемой поверхности обеспечивает построение математической модели движения тела человека и разработку компьютерной программы, которая через систему пространственного мультиплексирования (SDM) может управлять биопротезом человека (рис.5)

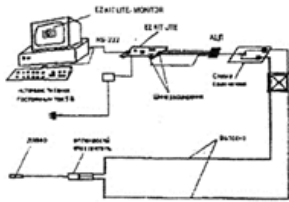


Рис.5. Схема включения волоконно-оптической измерительной системы (ВОИС) в измерительную сеть

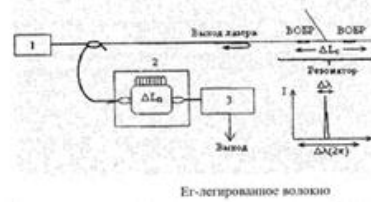


Рис.6. Волоконно-оптический брегговский лазерный датчик (ВОБР): 1 - лазер накачки; 2- считывающий интерферометр; 3- фазовый демодулятор



Рис. 7. Макет протезов с тактильным съемом биопотенциалов с поверхности тела человека с электродами и предусилителями



Рис.8. Вид сокращенной искусственной мышцы управляемой от ВОИС с гидролазерным усилителем

«Искусственная мышца» на основе гидролазерного эффекта использует тот же важный феномен живой природы, состоящий в том, что жидкость, находящаяся в сосудах или капиллярах под определенным давлением, расширяется и сжимается под действием когерентного оптического излучения. При этом создается гидродинамическое давление, а затем и сила, способная привести в движение определенные объекты. Наши исследования показали, что это может составить принципиально новое направление исследований по созданию когерентно способных искусственных мышц для биопротезов человека (рис. 7,8). Создание функционального аналога вестибулярного аппарата человека на основе лазерных технологий служит для управления устойчивостью антропоморфных биороботов и живых систем. Сравнение скорости реакций вестибулярного аппарата человека и относительной скорости срабатывания ВОИС-аналога показало, что скорость реакции аналога вестибулярного аппарата человека превышает человеческую в  $10^6$  раз. Этот эффект может быть использован в биомеханике и других областях науки и техники.

Продольный рост трубчатых костей позвоночных в основном осуществляется за счет процессов роста и окостенения в пластинке роста (Фрейдин А.Б., ИПМаш РАН, Санкт-Петербург). Пластинка роста представляет собой слой гиалинового хряща между метафизом и эпифизом кости. Рост кости в длину происходит за счет следующих процессов: (а) увеличение толщины пластинки роста за счет процессов деления и роста клеток хряща; и (б) процесс окостенения: растущие в объеме клетки хряща выделяют вещества в окружающий клетки матрикс, что приводит к его минерализации, минерализованный матрикс препятствует поступлению питательных веществ в растущие клетки хряща, что приводит к их гибели, на образовавшиеся лакуны в минерализованном матриксе прорастают кровеносные сосуды с клетками кости на них. При этом толщина пластинки роста остается постоянной, а длина кости увеличивается. Поверхность между живыми клетками хряща в матриксе и умершими клетками хряща в минерализованном матриксе называется границей окостенения. Сегодня хорошо известно, что эти процессы регулируются в процессе жизни как различными биологическими, так и механическими факторами. Разработка моделей описания влияния механических нагрузок на процессы роста костей, в частности, может помочь в детской хирургической ортопедии, где при лечении отклонений в процес-

се роста костей применяются механические нагрузки. При этом важно знать величину и вид нагрузок, при которых не происходит ни повреждение ткани, ни предварительное закрытие пластинки роста.

Пластинка роста моделируется как упругий слой «хрящевая ткань» в упругой среде «костная ткань» (Рис. 9). Рассматривается период роста кости, в котором одновременно имеют место два конкурирующих процесса: деление и увеличение в размере клеток хряща, и умирание клеток с их заменой костной тканью; при этом толщина пластинки роста остаётся постоянной. Первые два процесса описываются как объемный рост хрящевой ткани, второй – как стационарное движение межфазной границы.

Объемный рост учитывается в декомпозиции деформационного градиента на произведение двух тензоров – одного, отвечающего за необратимые, связанные с ростом, деформации, и другого - отвечающего за упругие деформации (аналогично распространенному подходу учета пластических или температурных деформаций). На границе окостенения ставятся условия непрерывности перемещений и усилий, а также кинетическое уравнение, связывающее скорость движения границы с движущей (конфигурационной, термодинамической) силой, которая принимается такой же, как в случае межфазной границы в нелинейно-упругом материале.

Исследуется влияние вида напряженно-деформированного состояния и объемного роста в пластинке роста на стационарное движение границы окостенения. Предполагается, что наблюдаемое в экспериментах преждевременное «мостикообразование» и последующее закрытие пластинки роста под нагрузкой, может быть связано с потерей устойчивости стационарного движения границы окостенения. Исследования устойчивости границы окостенения проводятся на основе разработанного кинетического критерия устойчивости, согласно которому возмущения в окрестности точек бифуркации линеаризованной системы уравнений равновесия развиваются, если состояние неустойчиво. Для ряда определяющих соотношений хрящевой и костной тканей показано следующее:

- 1) Анализ решения уравнений на границе окостенения показал, что растягивающие напряжения ведут к увеличению величины скорости движения границы окостенения, сжимающие – к уменьшению, что согласуется с экспериментальными данными.
- 2) Для меньших скоростей движения границы потеря устойчивости происходит для меньших параметров нагружения, что может интерпретироваться как уменьшение скорости движения границы окостенения может приводить к более быстрому началу «мостикообразования», что согласуется с наблюдаемыми данными.
- 3) Увеличение объемного роста оказывает как стабилизирующий так и дестабилизирующий эффект в зависимости от выбранной энергии деформации.

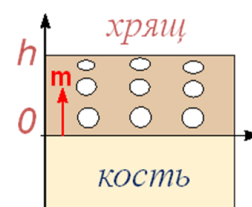


Рис.9. Модель пластинки роста.