



**Всероссийская конференция**

**МЕХАНИКА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ И СИСТЕМ**

13 ноября – 15 декабря 2011 года

Москва, Ленинградский проспект, 7

**ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

**МОСКВА  
2011**

**Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов  
управления Российской академии наук  
Научный совет РАН по механике конструкций из композиционных  
материалов  
Учреждение Российской академии наук Институт прикладной  
механики РАН  
Московский авиационный институт (Государственный технический  
университет)**

# **МЕХАНИКА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ И СИСТЕМ**

**ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ  
Всероссийской конференции**

**МОСКВА  
2011**

**«Механика наноструктурированных материалов и систем». Материалы  
Всероссийской конференции. Москва, 13 ноября – 15 декабря 2011 г. –  
Москва, ИПРИМ РАН, 2011 – 126 с.**

**В сборник материалов конференции включены тезисы докладов  
ученых из ряда институтов РАН, научных и образовательных  
учреждений. Представлены различные направления механики  
деформируемого твердого тела, механики жидкости, газа и плазмы,  
вычислительной механики и др.**

Составители:

Карнет Ю.Н., Яновская Ю.Ю., Левин Ю.К., Яновский Ю.Г.

© Учреждение Российской академии  
наук Институт прикладной механики  
РАН, 2011

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Секция 1. Прочность гетерогенных материалов, композитов, адаптивных материалов и конструкций</b>	<b>9</b>
<b>Исследование задачи термовязкоупругости с учётом фазовых превращений</b> Бабаджанова Вусалья Гамза кызы.....	10
<b>Выбор оптимальных параметров механического посадочного устройства пилотируемого транспортного корабля</b> Бакулин В.Н., Воронин В.В., Борзых С.В.....	11
<b>Выбор локальных параметров разбиения в конечно-элементных задачах</b> Бакулин В.Н., Инфлянскас В.В.....	13
<b>3D-код для расчета энерговыделения при поглощении ионизирующего излучения в многокомпонентных материалах объектов сложной геометрии</b> Бакулин В.Н., Острик А.В.....	15
<b>Конечноэлементная модель для расчета произвольных трехслойных оболочек</b> Бакулин В.Н., Репинский В.В.....	17
<b>Новые полимерные композиты с использованием шунгита и углеродных нанотрубок. Атомно-силовая микроскопия и физико-механические свойства</b> Беркова М.Д., Валиев Х.Х., Гусева М.А., Карнет Ю.Н., Косичкина К.П., Полянских Л.В., Юмашев О.Б.....	19
<b>Механические испытания металлических образцов с наноструктурированными лакокрасочными покрытиями</b> Гаврилов Д.Г., Мамонов С.В., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н.....	20
<b>Технологии наномодификации материалов для конструкций перспективных летательных аппаратов</b> Гамлицкий Е.Ю., Семенов В.Н.....	21
<b>Аэроупругие колебания анизотропной лопасти вращающегося несущего винта вертолета с переменным углом закручивания ее корневой части</b> Гришанина Т.В., Шклярчук Ф.Н.....	22
<b>Коэффициенты концентрации напряжений в слое тканого композита с локальными технологическими дефектами</b> Дедков Д.В., Зайцев А.В., Ташкинов А.А.....	23
<b>Определение эксплуатационных возможностей малонаполненных антифрикционных композиционных материалов на основе ПТФЭ</b> Дедюкин А.Е.....	25
<b>Нелинейная волновая динамика градиентно-упругих сред</b> Ерофеев В.И., Шешенина О.А.....	26
<b>Приложение трехмерной теории оболочек к некоторым задачам стационарной динамики</b> Жаворонок С.И.....	27
<b>Экспериментальное исследование противоударной стойкости керамик и композитов</b> Жейков В.В., Коняев А.А., Толкачев В.Ф.....	28
<b>Моделирование процесса эксплуатации колец из терморасширенного графита в кранах с уплотнением по штоку</b> Зайцев А.В., Злобин Н.Г., Исаев О.Ю., Рогов Д.С., Смирнов Д.В., Ханов А.М.....	29
<b>Неупругое деформирование и разрушение однонаправленно армированных волокнистых композитов случайной структуры при многоосном пропорциональном нагружении</b> Зайцев А.В., Кислицын А.В., Соколкин Ю.В.....	31

<b>Общие закономерности случайных полей напряжений и деформаций в волокнистых, дисперсно-упрочненных и высокопористых неоднородных материалах стохастической структуры и биокompозитах</b> Зайцев А.В., Кокшаров В.С., Соколкин Ю.В.....	33
<b>Оценка начальной прочности анизотропной крепи сферической и цилиндрической горизонтальной горной выработки в массиве осадочных пород</b> Зайцев А.В., Кутергин А.В., Соколкин Ю.В., Фукалов А.А.....	35
<b>Агрегация частиц нанонаполнителя и предел текучести дисперсно-наполненных полимерных нанокомпозитов</b> Козлов Г.В., Султонов Н.Ж., Яновский Ю.Г., Микитаев А.К.....	37
<b>Влияние малых добавок углеродных нанотрубок на комплекс свойств эластомерных материалов</b> Корнев Ю.В., Бойко О.В., Гусева М.А., Чиркунова С.В.....	38
<b>Применение метода наноиндентирования для исследования механических свойств различных материалов и покрытий</b> Корнев Ю.В., Бойко О.В., Чиркунова С.В.....	39
<b>Исследование кручения вязкоупругого цилиндра с учётом зависимости свойств материала от температуры</b> Курбанов Наби Тапдыг оглы.....	40
<b>Исследование свойств и структуры теплозащитного микро-наноструктурного композиционного покрытия лопатки ГТД с учетом условий нанесения</b> Лепешкин А.Р.....	41
<b>Пространственно-временное обобщение вязкоупругости. Некоторые приложения в проблемах теплопереноса в однородных и структурированных средах</b> Лурье С.А.....	42
<b>Эффекты увеличения диссипативных потерь в многофазных материалах с вязкоупругими межслойными структурами. Приложение к дисперсным композитам со сферическими включениями и к композитным волокнистым системам</b> Лурье С.А., Соляев Ю.О., Тучкова Н.П., Лыкосова Е.Д.....	43
<b>Решение связанной электротермомеханической задачи для стержня из сплава с памятью формы, испытывающего прямой фазовый переход после неполного обратного</b> Мишустин И.В.....	44
<b>Экспериментальное исследование релаксации напряжений и ограниченной ползучести в никелиде титана</b> Мовчан А.А., Казарина С.А.....	46
<b>Две модели реономного поведения сплавов с памятью формы</b> Мовчан А.А., Климов К.Ю.....	48
<b>О динамическом оценивании времени жизни многоэлементной системы неизвестного размера со случайными значениями прочности элементов</b> Онищенко Д.Д.....	50
<b>Влияние комплекса параметров на напряженное состояние образцов из пространственно-армированного композита</b> Ошева И.Ю.....	51
<b>О влиянии малых величин в разрешающих уравнениях на критические нагрузки цилиндрической оболочки</b> Сильченко Л.Г., Сильченко Т.Л.....	52

<b>Методика прогноза эффективных термоупругих свойств композитной керамики на основе SiC, армированной углеродными нанотрубками</b> Соляев Ю.О., Лурье С.А., Касимовский А.А., Иванова Д.Д.....	53
<b>Методология численного решения обратных задач теплопереноса в анизотропных композиционных материалах</b> Формалев В.Ф., Кузнецова Ек.Л.....	54
<b>Связность гексагональной структуры и нанотрубок</b> Цициашвили Г.Ш., Лосев А.С.....	55
<b>Исследование влияния микро- и наноразмерного минерала шунгит на комплекс свойств кремнийорганических эластомеров</b> Чиркунова С.В., Корнев Ю.В., Бойко О.В., Яновский Ю.Г., Копылов В.М.....	56
<b>Распределение кинетической энергии между морфологически различными группами фрагментов, образованных при высокоскоростной фрагментации ударника на дискретных преградах</b> Шумихин Т.А., Мягков Н.Н., Безруков Л.Н.....	57
<b>Свойства эжекты, генерируемой при высокоскоростном пробитии тонких экранов, изготовленных из различных конструкционных материалов</b> Мягков Н.Н. Шумихин Т.А., Безруков Л.Н., .....	58
<b>Исследование магнитных свойств магнетита, полученного различными способами, в зависимости от изменения температуры</b> Юмашев О.Б., Шалашилин А.Д., Гусева М.А., Густова Т.А.....	59
<b>Фрактальное приближение в механике наноструктурированных композитных сред</b> Яновский Ю.Г.....	60
<b>Секция 2. Проблемы горения и детонации сложных сред</b>	<b>61</b>
<b>Влияние электрического разряда на низкотемпературное воспламенение в химическом реакторе сжатия</b> Битюрин В.А., Филимонова Е.А.....	62
<b>Метод воздействия на свободные нестационарные воздушные вихри: физические основы и результаты экспериментов</b> Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н., Горбачев М.А.....	63
<b>О горении турбулентных струй в спутном потоке</b> Воротилин В.П.....	64
<b>Исследование влияния акустического воздействия на процессы воспламенения и горения</b> Голуб В.В., Володин В.В., Бакланов Д.И., Иванов К.В., Иванов М.Ф., Кривокорытов М.С., Тарасенко И.Н.....	66
<b>Термодинамический анализ процессов горения с учетом ограничений на наномасштабные потоки вещества и энергии</b> Каганович Б.М., Кейко А.В., Шаманский В.А., Зароднюк М.С.....	67
<b>Воспламенение и горение керосино-воздушной смеси в сверхзвуковом канале при электрическом разряде</b> Левин В.А., Громов В.Г., Афонина Н.Е.....	68
<b>Формирование детонации за счет внешних силовых воздействий</b> Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В.....	69
<b>Инициирование детонации в сверхзвуковых потоках без подвода энергии</b> Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В.....	70

<b>Влияние формы сопла на тяговые характеристики детонационного двигателя</b> Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В.....	71
<b>Автоколебания при горении твердого топлива</b> Полежаев Ю.В., Гешеле В.Д., Моргачев Н.Н., Раскатов И.П., Стоник О.Г.....	72
<b>Секция 3. Аэро- и гидромеханика гетерогенных сред</b>	<b>73</b>
<b>Разрывы в средах с усложненной дисперсией</b> Бахолдин И.Б.....	74
<b>Взаимодействие волн типа цунами с подводными преградами</b> Бошенятов Б.В., Попов В.В., Левин Ю.К.....	75
<b>Асимптотическое усреднение уравнений фильтрации Бринкмана в «полупроницаемых» средах</b> Волков-Богородский Д.Б., Власов А.Н.....	77
<b>К вопросу о механизме распределения сероводорода по глубине Черного моря</b> Воротилин В.П., Кошоридзе С.И., Левин Ю.К., Полотнюк О.-В.Я.....	78
<b>О проблеме гидродинамического взаимодействия частиц в идеальной жидкости</b> Гуськов О.Б.....	79
<b>Влияние облака инертных частиц на распространение гетерогенной детонации</b> Федоров А.В., Кратова Ю.В.....	81
<b>Математическое моделирование процесса выброса угля и газа с учетом межгранулярного взаимодействия частиц и десорбции метана</b> Федоров А.В., Федорченко И.А.....	83
<b>Маховское отражение в задачах взаимодействия падающей ударной волны в воздухе с приповерхностным слоем дисперсных частиц</b> Фокеев В.П.....	84
<b>Секция 4. Вычислительные методы механики наноструктурированных сред</b>	<b>86</b>
<b>Нейросетевая модель вязкоупругих сред в пространстве состояний</b> Басистов Ю.А., Яновский Ю.Г.....	87
<b>Наногетероструктуры: многоуровневое математическое моделирование, формирование, диагностика свойств</b> Вахрушев А.В., Липанов А.М.....	88
<b>Усреднение нелинейного уравнения теплопроводности при моделировании распространения тепла в материалах со слоистой структурой</b> Власов А.Н., Волков Богородский Д.Б., Талонов А.В., Саваторова В.Л.....	89
<b>Моделирование реакции твердых вязкоупругих сред при динамических нагружениях</b> Гасанов Аллахверди Биякир оглы, Курбанов Наби Тапдыг оглы, Бабаджанова Вусаля Гамза кызы.....	90
<b>Применение разностной схемы для расчета стационарных течений однородного сжимаемого газа в пограничном слое</b> Гахраманов П.Ф., Гаджиева Г.Ф.....	91
<b>Вычисление констант и коэффициентов свойств вещества на наноуровне</b> Гелиев А.В., Егоров Б.В., Маркачев Ю.Е., Семенов В.Н. Петров Ю.В.....	93

<b>Квантово-механический подход к моделированию механических свойств наночастиц и наносистем</b>	
Заводинский В.Г.....	94
<b>Влияние типа катиона на структуру межфазной границы TiO<sub>2</sub>/электролит: МД моделирование</b>	
Кисленко С.А., Амиров Р.Х., Самойлов И.С.....	95
<b>Получение точных решений неоднородного уравнения Бюргерса на примере задачи об акустических волнах в сопле Лавалья</b>	
Кудрявцев А.Г., Сапожников О.А.....	96
<b>Нестационарные волны в заполненной упругой средой псевдокоссера шаре</b>	
Лай Тхань Туан, Тарлаковский Д.В.....	97
<b>Моделирование и управление мехатронным комплексом экструзионной обработки полимеров</b>	
Малафеев С.И., Сагиров С.Н.....	98
<b>Упруго-пористая полуплоскость под действием нестационарных поверхностных возмущений</b>	
Нгуен Нгок Хоа, Тарлаковский Д.В.....	99
<b>Квантово-механическое исследование механизмов взаимодействия компонентов и возможностей модификации эпоксидных клеев, наполненных углеродными нанотрубками</b>	
Никитина Е.А., Яновский Ю.Г., Никитин С.М.....	101
<b>Вариант подхода к моделированию линейной упругой среды</b>	
Шоркин В.С., Фроленкова Л.Ю., Якушина С.И.....	103



## **Секция 1**

# **Прочность гетерогенных материалов, композитов, адаптивных материалов и конструкций**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДАЧИ ТЕРМОВЯЗКОУПРУГОСТИ С УЧЁТОМ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

Бабаджанова Вусалья Гамза кызы

*Сумгаитский Государственный Университет, г. Сумгаит, Азербайджан*

Рассмотрим цилиндр с кольцевым сечением, вращающийся вокруг оси симметрии с угловой скоростью  $\omega(t)$ . На внутреннюю и внешнюю поверхности цилиндра действуют равномерно распределенные нагрузки и на внутреннюю поверхность мгновенно действует температура  $T_1$ , которая в дальнейшем сохраняется.

Считаем, что при абляции внутренней поверхности радиус  $r_1$  является монотонно возрастающей функцией времени  $r_1 = r_1(t)$ . Внешняя поверхность цилиндра жестко соединена с упругой оболочкой, толщиной  $h$ . Тогда с помощью безмоментной теории находим:

$$\sigma_r(b, t) = -Be_0(b, t)$$

где  $B = \frac{1-\nu_R}{1+\nu_R} \frac{E_k h}{h+b}$ ,  $E_R, \nu_R$  - упругие характеристики оболочки,  $b$  - внутренний радиус,  $h$  - толщина оболочки.

В рассматриваемом случае только один из компонентов вектора перемещений отличен от нуля. Для компонентов тензора деформации  $u = u(r, t) \neq 0$ ,  $e_r = \frac{\partial u}{\partial r}$ ;  $e_\theta = \frac{u}{r}$

Объемная деформация определяется формулой

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} = l(r, t) \quad \text{или} \quad \frac{1}{r} \left( \frac{\partial}{\partial r} \right) (ur) = l, \quad \text{отсюда}$$

$$u(r, t) = A(t) / 2r + \left( \frac{1}{r} \right) \int r l(r, t) dr,$$

$$e_r = -A(t) / 2r^2 + l(r, t) - \frac{1}{r^2} \int r l(r, t) dr, \quad e_\theta = A(t) / 2r^2 + \frac{1}{r^2} \int r l(r, t) dr$$

В изотропных несжимаемых линейно-вязкоупругих материалах напряжения и деформации, с учетом зависимости свойств материала от температуры, связаны следующим образом

$$\sigma_{r,\theta} = \int_0^t J(t'-\tau') \frac{\partial}{\partial \tau} l(r, t) d\tau + \int_0^t K(t'-\tau') \frac{\partial}{\partial \tau} e_{r,\theta}(\tau) d\tau$$

$$\sigma_z = \int_0^t J(t'-\tau') \frac{\partial}{\partial \tau} l(r, \tau) d\tau$$

где  $J, K$  - функции объемной и сдвиговой релаксации,  $t'$  - приведенное время.

Найдены решения задачи о поведении полого вязкоупругого цилиндра, скрепленного с упругой оболочкой, на внутреннюю поверхность которой действует равномерное давление и высокая температура, когда механические свойства материала зависят от температуры, которая превращает задачу в нелинейную с учетом абляции на внутренней поверхности.

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОСАДОЧНОГО УСТРОЙСТВА ПИЛОТИРУЕМОГО ТРАНСПОРТНОГО КОРАБЛЯ

Бакулин В.Н., Воронин В.В.\* , Борзых С.В.\*

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

*\*ОАО РКК "Энергия" им. С.П.Королева, г. Королев М.О., Россия*

Процесс посадки возвращаемого аппарата (ВА) пилотируемого транспортного корабля является одной из ключевых фаз его функционирования. Рассеивание большой остаточной кинетической энергии, которой обладает ВА перед касанием с посадочной поверхностью, осуществляется механическим посадочным устройством (ПУ) (рис.1). ПУ включает в себя четыре посадочные опоры (ПО) с равномерным азимутальным расположением опор через  $90^\circ$ . Все четыре ПО, в состав которых входят стойки-амортизаторы, сходящиеся в виде треноги к тарели, которая непосредственно контактирует с поверхностью, одинаковы по конструкции.

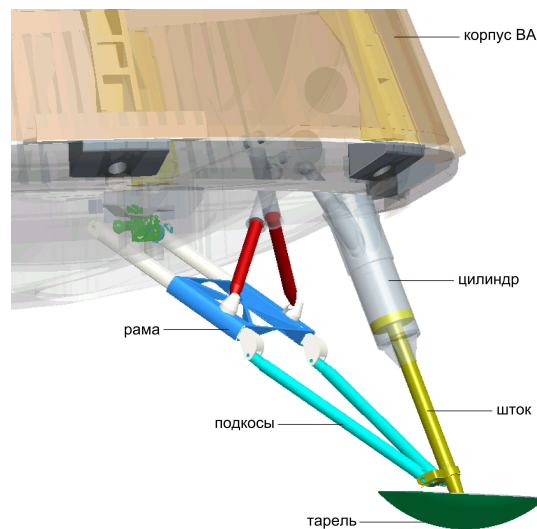


Рис.1. Опора ПУ.

Движение ВА с механическим ПУ моделируются системой тел, состоящей из центрального тела (корпуса СА) и демпферов, один конец которых крепится к корпусу СА, а другой – к тарели. К каждой тарели сходятся от корпуса три демпфера; иногда один или два демпфера в «треноге» могут быть заменены жесткими стержнями.

Каждый амортизатор считается состоящим из штока и цилиндра; внутри последнего находится энергопоглотитель (например, сминаемые соты).

Тела рассматриваются как свободные, а действие связей заменяется соответствующими силами реакций связей и моментами. С целью определения реакций связей записываются специальные уравнения связей, вид и структура которых определяется конкретным характером каждой связи. Для каждого тела (корпуса ВА, тарелей, цилиндров и штоков) записываются уравнения движения центров масс (в инерциальной системе координат) и вращения относительно центров масс (в связанных системах координат тел).

Важно отметить, что в силу ряда обстоятельств (погрешностей системы управления спуском, порывов ветра) кинематические параметры ВА лежат в некотором диапазоне. Необходимыми требованиями к процессу посадки являются: сохранение

устойчивости в процессе движения ВА по посадочной поверхности, «мягкость» посадки (ограничения, например, по перегрузкам), обеспечение клиренса между полностью обжатой опорой и корпусом ВА.

В результате детального анализа определены оптимальные кинематические параметры, необходимые для раскрытия и фиксации ПУ, и силовые характеристики амортизаторов опор ПУ, обеспечивающих успешную посадку ВА практически для любых возможных сочетаний исходных параметров к моменту первого касания посадочной поверхности на грунты различной прочности от слабых супесчаных до мерзлых тяжелых грунтов.

## ВЫБОР ЛОКАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАЗБИЕНИЯ В КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ ЗАДАЧАХ

Бакулин В.Н., Инфлянскас В.В.

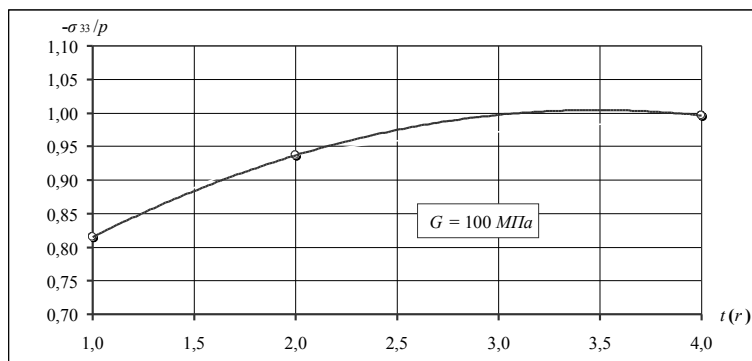
*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

В инженерной практике широко используется метод конечных элементов (МКЭ). При расчете реальных конструкций ввиду наличия локальных факторов и необходимости ограничения порядка системы линейных алгебраических уравнений разбиение области оказывается неравномерным. Характеристикой этой неравномерности может служить плотность конечно-элементной сетки (КЭС), понимаемая как количество конечных элементов в геометрической единице (единице длины, площади или объема) в зависимости от вида элемента. Вопросы сходимости решения в зависимости от плотности сетки и метод оценки эффективности примененного разбиения рассматриваются в работе [1].

В основе метода лежит рассмотрение последовательности задач с кратно возрастающей в рассматриваемой подобласти плотностью КЭС. Если в этой подобласти нет особенности, то ввиду известной корректности МКЭ возникает насыщение решения по параметру плотности. Насыщение означает появление минимакса выбранной функции (напряжения, перемещения и т.д.). Для обработки полученных численных результатов для точек, находящихся в зоне насыщения используется квадратичная интерполяция.

Наглядной иллюстрацией метода может служить анализ напряженного состояния трехслойной ортотропной цилиндрической оболочки с изотропным слабым наполнителем под действием локальной нагрузки  $p$  [1].

На рисунке представлен интерполяционный график радиальных нормальных напряжений в наполнителе по плотности сетки при модуле сдвига  $G=100 \text{ МПа}$ , при нормировании минимальной плотности:  $t_1=1$ .



Из рисунка видно, что при нормированной плотности  $t(r) = 4$  напряжения  $\sigma_{33}$  прошли точку минимакса, следовательно, достаточно разбиения наполнителя на 8 слоев по толщине.

### Литература

1. Бакулин В.Н., Инфлянскас В.В. К вопросу о достаточной плотности конечно-элементной сетки / Материалы XVII Международной конференции по

вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2011), 25-31 мая 2011г. г. Алушта. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2011. – С.40-44.

## **3D-КОД ДЛЯ РАСЧЕТА ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ПРИ ПОГЛОЩЕНИИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МАТЕРИАЛАХ ОБЪЕКТОВ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ**

Бакулин В.Н., Острик А.В.

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

*<sup>1</sup>Институт проблем химической физики Российской академии наук,  
г. Черноголовка, Россия*

Прогнозирование параметров механического действия ионизирующего излучения (ИИ) на гетерогенные покрытия (ГП) со структурой представляет значительный практический интерес [1]. Корректный расчет энерговыделения в компонентах структуры ГП во многом определяет и точность оценки этих параметров. Для расчета энерговыделения от ИИ в многослойных преградах с ГП используется, как правило, метод Монте-Карло в одномерном приближении [2]. В [3] предложен гибридный подход к задаче определения энерговыделения в гетерогенных структурах ГП, позволяющий учесть перераспределение энергии между компонентами ГП вторичным электронным излучением в неоднородной геометрии. При воздействии на ГП излучения с мягким спектром механическое действие ИИ полностью определяется процессами в приповерхностном слое покрытия, в котором неравномерность энерговыделения в компонентах структуры весьма значительна, что также требует проведения расчетов в многомерной постановке.

В настоящей работе предлагается численный 3D-код для расчета распространения и поглощения ИИ в многокомпонентных материалах объектов сложной геометрии. Разработанный алгоритм состоит из нескольких этапов решения задачи и использует метод Монте-Карло с учетом основных процессов взаимодействия ИИ с веществом (фотопоглощения, комптоновского и рэлеевского рассеяний, флюоресценции и вторичного электронного излучения).

На первом этапе решается задача о взаимодействии ИИ заданного спектра с ГП усредненного состава (гомогенное приближение) на основе методического аппарата, разработанного в [1-3]. В различных сечениях ГП рассчитываются спектрально-угловые энергетические распределения импульса ИИ, которые используются в дальнейшем как распределенные источники ИИ в локальных зонах расположения 3D-структур.

Следующий этап решения задачи – сеточное разбиение трехмерной элементарной ячейки ГП. В зависимости от типа конкретной структуры ГП это разбиение осуществляется по разработанным алгоритмам с помощью задания замкнутых оболочек, разделяющих однородные части ячейки.

Заключительный этап – расчет серии задач в выбранных сечениях покрытия для определения распределения энерговыделения в компонентах структуры ГП.

Приводятся результаты расчетов энерговыделения в ГП с дисперсными наполнителями из стеклянных и углеродных микросфер с напылением тяжелых металлов (вольфрама и никеля).

### **Литература**

1. Острик А.В. Прогнозирование защитных свойств покрытий из сферопластиков при воздействии высокоинтенсивных потоков ионизирующего излучения // Деформация и разрушение материалов. – 2010. – №2. – С.36-43.
2. Бакулин В.Н., Грибанов В.М., Острик А.В. и др. Механическое действие РИ на

- тонкостенные композиционные конструкции. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 256с.
3. Грибанов В.М., Острик А.В., Ромадинова Е.А. Метод оценки энерговыделения в компонентах облучаемого рентгеновским излучением сферопластика с учетом перераспределения энергии электронами // Конструкции из композиционных материалов. – 2009. – Вып.1. – С. 40-47.



## КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОИЗВОЛЬНЫХ ТРЕХСЛОЙНЫХ ОБОЛОЧЕК

Бакулин В.Н., Репинский В.В.

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

В большинстве работ разработан ряд конечных элементов (КЭ) для расчета трехслойных и многослойных композитных оболочек вращения. В настоящей работе предлагаются треугольные КЭ несущего слоя и слоя заполнителя трехслойной оболочки двойкой кривизны. Элементы имеют по пять степеней свободы в узле  $u, v, w, \partial w/\partial x, \partial w/\partial y$ . Принимается, что деформирование несущих слоев конструкции с достаточной степенью точности описывается с помощью гипотез Кирхгофа-Лява, а деформирование заполнителя - уравнениями теории упругости для трехмерного тела.

Функции формы для КЭ несущих слоев, выраженные в L-координатах [1] выглядят следующим образом:

$$[N_1]^T = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0 \\ 0 & L_1 & 0 \\ 0 & 0 & L_1^3 + L_1^2 L_2 + L_1^2 L_3 - L_1 L_2^2 - L_1 L_3^2 \\ 0 & 0 & b_3 (L_1^2 L_2 + \frac{1}{2} L_1 L_2 L_3) - b_2 (L_1^2 L_3 + \frac{1}{2} L_1 L_2 L_3) \\ 0 & 0 & c_3 (L_1^2 L_2 + \frac{1}{2} L_1 L_2 L_3) - c_3 (L_1^2 L_3 + \frac{1}{2} L_1 L_2 L_3) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Здесь приведены функции формы для первого узла, а функции формы для узлов 2 и 3 получаются циклической перестановкой индексов 1,2,3. Таким образом вектор перемещений можно выразить через узловые перемещения:

$$\{u\} = [[N_1] [N_2] [N_3]]^T \{u_i\} = T \{u_i\}$$

где  $[N_i]$  - функции формы  $i$ -го узла, определяемые по формулам (1);  $\{u\} = \{u, v, w\}$  - вектор перемещений КЭ несущего слоя;  $\{u_i\} = \{u_1, v_1, \dots, \partial w_3/\partial x, \partial w_3/\partial y\}$  - вектор узловых перемещений КЭ несущего слоя.

При получении аппроксимирующих функций для КЭ заполнителя применяется подход, предложенный в работе [2], где для аппроксимации перемещений по тангенциальным координатам используются функции формы несущих слоев (что обеспечивает совместность перемещений по поверхностям раздела КЭ заполнителя и несущих слоев), а по радиальной координате – полиномы первого порядка. Таким образом, в качестве функций формы КЭ заполнителя используются полиномы вида:

$$N_i^j = N_i N_j, \quad i=1,2,3; \quad j=1,2, \quad (2)$$

где  $N_i^j$  - функция формы  $i$ -го узла, находящегося на внутренней ( $j=1$ ) или наружной ( $j=2$ ) поверхности КЭ;  $N_i$  - функции формы, зависящие от координат  $x$  и  $y$  и определяемые выражением (1);  $N_j$  - функции формы, зависящие от координаты  $z$  и представляющие собой полиномы первого порядка.

### **Литература**

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. / Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
2. Бакулин В.Н. Эффективные модели для уточненного анализа деформированного состояния трехслойных не осесимметричных цилиндрических оболочек // Доклады РАН. – 2007. – Т.414. – №5. – С.613-617.

## **НОВЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШУНГИТА И УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК. АТОМНО–СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

Беркова М.Д., Валиев Х.Х., Гусева М.А., Карнет Ю.Н., Косичкина К.П.,  
Полянских Л.В., Юмашев О.Б.

*Институт прикладной механики Российской Академии наук, г. Москва, Россия*

В настоящее время широко развиваются исследования, связанные со структурными, физико-механическими, химическими свойствами шунгита и углеродных нанотрубок (УНТ) и ведется большая работа по их практическому применению в качестве компонентов композитных материалов.

В ИПРИМ РАН изготовлены новые опытные образцы резин на основе бутадиен – метилстирольного каучука СКМС–30–АРК (серии Ш 101–Ш 105 и НТ 1–НТ 4). Применена стандартная промышленная рецептура, характерная для наполнителей из технического углерода типа N 660, где вместо N660 в качестве наполнителей использовался шунгит (Карелия, Россия) и углеродные нанотрубки (УНТ), синтезированные в ИПРИМ РАН [1]. УНТ получены каталитическим пиролизом ацетилена на нанокластерах железа и кобальта в матрице из оксида алюминия (метод каталитического химического осаждения паров – CVD). Использовались порошкообразные частицы шунгита как микро, так наноразмерные, полученные дополнительной физико-химической обработкой на планетарной шаровой мельнице РМ -100 (Retsch, Германия).

Исследование поверхности полученных эластомерных композитов проведено на атомно-силовом микроскопе EasyScan (Nanosurf, Швейцария), работавшем в контактном режиме на воздухе при комнатной температуре. Одновременно использовали моду силовой модуляции для получения материальных контрастов. Защита АСМ от внешних возбуждений обеспечивалась динамическим антивибрационным столиком TS-150 (Fabrik am Weiher, Швейцария). Поверхность этих резин в нанодиапазоне изучалась также с помощью неконтактного сканирующего оптического интерференционного микроскопа New View 5022 (Zygo Inc., США). Обработку АСМ и оптических изображений проводили с использованием современной вычислительной программы SPIP™ (Image Metrology, Denmark).

Изучение физико-механических свойств этих опытных образцов резин проведено на разрывной машине UTS-10 (Ulm, Германия). Проведенные исследования установили существенное улучшение прочностных свойств вновь синтезированных резин.

Установлена корреляция микроскопической структуры поверхности с макроскопическими механическими свойствами исследованных композитов.

### **Литература**

1. Корнев Ю.В., Яновский Ю.Г., Никитин С.М., Бойко О.В., Гусева М.А., Николаева С.В. Влияние углеродных нанотрубок на комплекс свойств эластомерных материалов / Сборник тезисов докладов участников Третьего международного конкурса научных работ молодых ученых в области нанотехнологий в рамках Международного форума по нанотехнологиям Rusnanotech 2010, М., 2010, CD.

## **МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ С НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫМИ ЛАКОКРАСОЧНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ**

Гаврилов Д.Г., Мамонов С.В., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н.

*Московский государственный авиационный институт (национальный  
исследовательский университет), г. Москва, Россия*

В работе проводятся экспериментальные исследования по определению механических характеристик образцов из различных металлов, на которые наносятся защитные наноструктурированные лакокрасочные покрытия. Предварительно на подготовленную поверхность образцов наносилась полимерная порошковая краска фирмы Europolveri (Италия) на эпоксидно-полиэфирной основе электростатическим распылением. Далее для повышения механических свойств и придания поверхности дополнительной износостойкости и ударопрочности на окрашенную поверхность наносился керамический нанолак Ceramiclear Deltron D8105 фирмы PPG Industries (США). Нанесение покрытий проводилось в покрасочной камере Gema (Швейцария).

Образцы испытываются на универсальной испытательной машине Zwick Z100 (Германия) на центральное растяжение и четырехточечный изгиб, сравниваются их механические характеристики с аналогичными образцами без покрытия, а также с образцами, на которые на порошковую краску наносился защитный полиуретановый лак или декоративный лак Glitter.

Выработаны практические рекомендации.

*Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по лоту «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области нанотехнологий и наноматериалов», госконтракт №02.740.11.0790 от 17.05.2010г.*

## ТЕХНОЛОГИИ НАНОМОДИФИКАЦИИ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Гамлицкий Е.Ю., Семенов В.Н. □

*Московский физико-технический институт, г. Москва, Россия*

□ *ФГУП “ЦАГИ”, г. Жуковский, Россия*

Исследуются свойства интеллектуальных и наномодифицированных материалов, которые могут использоваться при создании адаптивных конструкций летательных аппаратов (ЛА) [1-3]. Поверхности технических объектов, в том числе ЛА, необходимо защищать от климатических воздействий и явлений, таких как солнечное излучение, резкие перепады температуры, обледенение, соленость среды. Необходимо также обеспечить получение новых свойств для материалов конструкции и ее элементов: адаптационных, электропроводных, радиоотражательных, фрикционных, обливочных и иных.

Многие задачи придания поверхности необходимых свойств могут быть решены путем нанесения соответствующих тонких и наноразмерных пленок на эластомерное основание. Приведены результаты использования метода магнетронного распыления для нанесения металлических и металлооксидных пленок на техническую резину. Описаны режимы напыления и параметры пленочного покрытия. Приведены результаты влияния механического воздействия на свойства пленок. Показано, что наноразмерные покрытия при больших деформациях по структуре и свойствам существенно отличаются от макроструктурного металлического покрытия. Скольжение кластеров - блоков-нанослоев относительно друг друга сохраняет полное перекрытие площади упругой подложки металлом при больших относительных деформациях. Это явление воспринимается как псевдоэластичность тонких пленок. При больших обратимых деформациях резины или упругого пластика с нанесенной пленкой их внешний вид, величина адгезии и в значительной мере проницаемость не меняются.

Работы, связанные с наномодификацией материала, позволили поднять уровень возвращаемых относительных деформаций для сплавов с памятью формы (СПФ) с 4 до 8%, выявить неожиданные “перекрестные” сочетания взаимодействия нормальных и касательных напряжений (Гончарук П.Д., Семенов В.Н., Андронов Н.И., Мовчан А.А., Прокошкин С.Д. и др.) Введение в матрицу композита наноэлементов с волокнистой структурой приводит к улучшению механических характеристик композита, его прочности и трещиностойкости (Смотров С.А.) Добавление 1-2% углеродных нанотрубок (УНТ) в клеи увеличивает на 15-20% прочность соединения в группах материалов типа пластик-титан и алюминиевого сплава Д16 (Вермель В.Д., Доценко А.М. и др.)

### Литература

1. Басс Ю.П., Гамлицкий Е.Ю., Гамлицкий Ю.А., Слепцов В.В. Нанопленки на резиновой подложке. Структура и механизм псевдоэластичности // Каучук и резина. – 2003. – №5. – С.26-29.
2. Вякхи И.Э., Гончарук П.Д., Лаврухин Г.Н., Мовчан А.А., Семенов В.Н. Технические решения для адаптивных авиационных конструкций с использованием сплавов с памятью формы // Ученые записки ЦАГИ. – 2007. – Т. XXXVIII. – №3-4. – С.158-168.
3. Семенов В.Н. Улучшение прочностных и функциональных свойств авиационных конструкций путем использования наномодифицированных материалов / Всероссийская конф. «Механика и наномеханика структурно-сложных гетерогенных сред». – М.: Издание ИПРИМ РАН, 2010. – С.62-71.

## **АЭРОУПРУГИЕ КОЛЕБАНИЯ АНИЗОТРОПНОЙ ЛОПАСТИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА С ПЕРЕМЕННЫМ УГЛОМ ЗАКРУЧИВАНИЯ ЕЕ КОРНЕВОЙ ЧАСТИ**

Гришанина Т.В., Шклярчук Ф.Н.\*

*Московский государственный авиационный институт (национальный  
исследовательский университет), г. Москва, Россия*

*\*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

Рассматриваются вынужденные аэроупругие колебания в режиме висения вертолѐта вращающейся анизотропной лопасти с переменным углом закручивания её корневого сечения. Для составления уравнений изгибно-крутильных колебаний анизотропной лопасти используется балочная теория изгиба, поперечного сдвига и кручения со свободными (нестесненными) депланациями поперечных сечений и метод отсеков (балочных конечных элементов) с квазистатической аппроксимацией перемещений по длине отсека.

Погонные аэродинамические нагрузки (подъемная сила и крутящий момент) при вынужденных гармонических колебаниях лопасти определяются по нестационарной (в частном случае – по квазистационарной) теории плоского обтекания поперечных сечений.

За счет анизотропии лопасти (косой укладки армирующих волокон композитной обшивки) изгиб и кручение лопасти упруго связаны между собой и поэтому путем изменения характеристик анизотропии лопасти в целом или её отдельных отсеков можно изменить тягу (подъемную силу) несущего винта и аэродинамические характеристики лопасти.

Выполнены расчеты деформированного состояния и аэродинамического нагружения лопасти при постоянном и переменном углах закручивания корневого сечения лопасти при различных характеристиках анизотропии одного корневого или нескольких или всех отсеков лопасти. Оценено влияние анизотропии на критическую скорость дивергенции.

## **КОЭФФИЦИЕНТЫ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В СЛОЕ ТКАНОГО КОМПОЗИТА С ЛОКАЛЬНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ДЕФЕКТАМИ**

Дедков Д.В., Зайцев А.В., Ташкинов А.А.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
г. Пермь, Россия*

При производстве тканых композитов с искривленными волокнами неизбежны технологические дефекты, снижающие эксплуатационные свойства изделий. К числу типичных дефектов относятся возникающие при прошивке слоев разрывы нитей основы или утка, а также внутренние поры, которые возникают в областях, расположенных вблизи участков волокон с наибольшей кривизной, и обнаруживаются только на этапе выходного ультразвукового контроля изделия. Эти области труднодоступны для проникновения полимерного связующего даже при условии вакуумирования или пропитки под давлением. Кроме того, обеспечение в этих участках наличия поликристаллической матрицы, осаждаемой из газовой фазы или при карбонизации полимеров также затруднено.

Разработана двухуровневая модель тканого композита с искривленными волокнами и поликристаллической матрицей, которая на основе численного решения краевых задач о произвольном нагружении слоя материала в своей плоскости позволила определить коэффициенты концентрации напряжений, вызванные наличием локальных технологических несовершенств: внутренняя закрытая пора, отсутствие нити утка, разрыв нити утка, одновременный разрыв нитей основы и утка (без и с дополнительной пропиткой и карбонизацией связующего в области дефекта). Полученные численные решения краевых задач методом конечных элементов позволили установить, что наибольший вклад в коэффициенты концентрации вносят касательные составляющая тензора напряжений. Значения этих напряжений более, чем в четыре раза, превышают соответствующие величины в слое тканого композита идеальной периодической структуры. Поэтому для повышения способности материалом сопротивляться внешнему силовому воздействию рекомендовано предусмотреть в технологическом процессе операции, обеспечивающие проникновение связующего в полости технологических локальных дефектов, а также дополнительную пропитку связующим, доуплотнение и карбонизацию, досаждение поликристаллической матрицы из газовой фазы в случае, если в результате ультразвукового контроля готового изделия обнаруживаются с внутренняя пористость. Как показали результаты вычислительных экспериментов, указанные операции позволяют снизить в полтора–два раза коэффициенты концентрации напряжений. В противном случае возможно развитие дефектов и последующее лавинообразное локализованное разрушение материала матрицы по механизмам сдвигов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-Урал №11-01-96033).*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МАЛОНАПОЛНЕННЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПТФЭ**

Дедюкин А.Е.

*Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Якутск, Россия*

В узлах трения современной бытовой и электронной техники используются антифрикционные композиции на основе полимерных материалов, особенно, композиции на основе политетрафторэтилена. С целью расширения возможностей использования малонаполненных антифрикционных материалов на основе политетрафторэтилена были поставлены следующие задачи: 1) определение их несущей способности; 2) определение скорости изнашивания при естественно низких температурах.

С целью решения первой задачи были проведены испытания по модифицированной методике, разработанной в Институте проблем машиноведения РАН. На основании результатов трибологических испытаний по нагрузочной способности при скорости скольжения 1 м/с и нагрузках от 100 до 1600 Н установлено, что разработанные полимерные нанокомпозиты обладают достаточно стабильными трибологическими свойствами в условиях исследованных нагрузок, что объясняется в основном образованием на поверхностях трения пленок фрикционного переноса. Установлено, что наполнение модификаторами, содержащими наноразмерные частицы, приводит к повышению несущей способности малонаполненных композиций на основе ПТФЭ в 2 раза по сравнению с композициями, содержащими обычные размеры.

Для определения скорости изнашивания при естественно низких температурах был разработан стенд для натуральных испытаний. При снижении температуры окружающего воздуха до  $-40^{\circ}\text{C}$  скорости изнашивания чистого ПТФЭ и материалов, пропитанных смазкой практически не меняются. Скорости изнашивания материалов, наполненных нанопшенилью магния при низких температурах повышаются примерно на порядок, монотонно снижаясь с повышением концентрации наполнителя. Снижение скорости изнашивания на порядок при низких температурах окружающего воздуха обнаружено на материале, наполненном нановолокнистым оксидом алюминия.

Низкий износ ПКМ, наполненных волокнистыми наполнителями, при отрицательных температурах окружающего воздуха объясняется дополнительным упрочнением композиции, вызванной обжатием частиц матрицей наполнителя, имеющих волокнистую структуру, о чем свидетельствует относительно большее повышение прочности при растяжении по сравнению с повышением прочности ПКМ с наполнителями сферической формы при низких температурах. Увеличение износа ПКМ при отрицательных температурах, вероятно, связано с тем, что в отличие от волокон, частицы наполнителя, имеющие сферическую форму, легче отрываются от матрицы, и в дальнейшем выступают в виде абразива.

Для выяснения изменения прочностных свойств испытуемых материалов от температуры окружающей среды были проведены испытания на разрывной машине при температурах плюс 23 и минус 40 градусов по Цельсию.

Выявлено, что резкое понижение удлинения при максимальной нагрузке по отношению к исходному (чистому) фторопласту приводит к резкому увеличению скорости изнашивания и, наоборот, увеличение данного показателя по отношению к чистому приводит к снижению скорости изнашивания. Причем в первом случае скорость изнашивания вопреки принятому утверждению, что интенсивный износ



происходит в пусковой момент, практически остается постоянной на весь период испытания.

## **НЕЛИНЕЙНАЯ ВОЛНОВАЯ ДИНАМИКА ГРАДИЕНТНО-УПРУГИХ СРЕД**

Ерофеев В.И., Шешенина О.А.

*Нижегородский филиал Учреждения Российской академии наук  
Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Нижний Новгород, Россия*

Метод альтернативной континуализации, предложенный ранее Х.Аскесом и А.Метрикиным, применен для получения нелинейной динамически непротиворечивой модели градиентно-упругой среды.

Исследованы особенности распространения упругих волн в таких средах: дисперсия продольных и сдвиговых волн; генерация высших гармоник, в том числе, «запрещенных» классической теорией упругости; самомодуляция волновых пакетов; формирование пространственно-локализованных волн деформации.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ ТЕОРИИ ОБОЛОЧЕК К НЕКОТОРЫМ ЗАДАЧАМ СТАЦИОНАРНОЙ ДИНАМИКИ**

Жаворонок С.И.

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

Получено решение некоторых модельных задач стационарной динамики упругих тел на базе приближенной трехмерной теории  $N$ -го порядка.

Уравнения движения теории  $N$ -го порядка получены в форме обобщенных уравнений Лагранжа второго рода континуальной системы при редукции числа степеней свободы в направлении нормали к базовой поверхности оболочки. Уравнения записаны как в обобщенных усилиях и скоростях, так и в виде системы в частных производных второго порядка по пространственным и временным переменным относительно обобщенных координат. Сформулированы начально-краевые задачи и проведен анализ основных свойств построенной модели. Также рассмотрена формулировка теории оболочек  $N$ -го порядка в виде системы квазиканонических уравнений Гамильтона.

Рассмотрена задача о распространении нормальных волн в упругом изотропном слое, построены дисперсионные соотношения. Исследована сходимость приближенного решения на основе теории  $N$ -го порядка в среднем квадратичном к точному решению Рэлея-Лэмба по значениям частот запираания, а также по формам нормальных волн, как в окрестности частот запираания, так и при некоторых характерных ненулевых значениях безразмерного волнового числа. Изучено распространение второй моды продольных волн в области малых значений волнового числа при отрицательных значениях групповой скорости, описываемое теориями различного порядка.

Рассмотрена задача о распространении нормальных волн в полом упругом цилиндре, построены приближенные дисперсионные уравнения, основанные на теории  $N$ -го порядка, и проведен анализ их решения. При построении перечисленных решений рассмотрены разные системы базисных функций: полиномы Лежандра, тригонометрические и специальные функции, и проанализирована сходимость решений, основанных на разных базисных системах.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № № 10-01-00714-а) и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы (государственные контракты №№ 16.740.11.0081 от 01.09.2010 г., 16.740.11.0132 от 02.09.2010 г.).*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТИВОУДАРНОЙ СТОЙКОСТИ КЕРАМИК И КОМПОЗИТОВ

Жейков В.В., Коняев А.А., Толкачев В.Ф.

*НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета, г. Томск, Россия*

В работе приведены результаты моделирования противоударной стойкости керамических и композиционных материалов, используемых в качестве элементов бронезащиты. Об эффективности использования керамических и композиционных материалов в качестве элементов бронезащиты судили по весовому параметру – весу единицы площади ударника и преграды. Экспериментальные исследования стойкости композиционных материалов к ударному проводились на двухступенчатой баллистической установке калибром 8 мм в диапазоне скоростей до 7 км/с [1]. В качестве ударников использовались компактные и стержневые элементы из стали ШХ-15 и сплава ВНЖ плотностью 7.85...18.6 г/см<sup>3</sup>. В качестве преград использованы: оксид алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, оксид алюминия марки КВП - 98 (корунд), диоксид циркония ZrO<sub>2</sub>, композиционные материалы TiC+NiCr и TiB<sub>2</sub>+B<sub>4</sub>C, стеклотекстолит марки СТКТ, СТКТ-НА. Регистрация начальной и запреградной скорости ударников производилась электроконтактным методом, состояние потока вторичных осколков за преградой контролировалось рентгеноимпульсным методом.

Керамические образцы в процессе удара разрушаются, и поэтому эффективность керамики определялась по глубине кратеров в алюминиевой плите-свидетеле в двух опытах: с керамической пластиной и без нее [2].

Проведена оценка эффективности пластин Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, КВП-98 (корунд), TiB<sub>2</sub>+B<sub>4</sub>C, ZrO<sub>2</sub>, TiC+NiCr в зависимости от скорости удара. Установлено, что максимальная эффективность керамики соответствует скоростям удара до 1 км/с, а с увеличением скорости соударения она снижается. Некоторое повышение эффективности в области скоростей 5..6 км/с обнаружено у керамики КВП-98 (корунд) и металлокомпозита TiB<sub>2</sub>+B<sub>4</sub>C. Основной причиной снижения эффективности можно считать уменьшение прочности из-за того, что впереди поверхности контакта ударник – преграда материал разрушается ударной волной.

В основу расчетных методик и инженерных формул положены результаты выполненных в течение ряда лет в НИИПММ ТГУ экспериментальных исследований бронепробиваемости. Для нахождения обобщенной зависимости установлено минимальное число работоспособных критериев подобия и вид функции, связывающей эти критерии. В основе предлагаемых связывающих соотношений заложена энергетическая модель, в которой объем вытесненного материала преграды пропорционален кинетической энергии ударяющего тела с учетом энергопотерь на сопутствующие прониканию явления.

*Работа выполнена при частичном финансировании по программе Минобрнауки РФ (проект РНП 2.1.2. 2509) и гранта РФФИ №10-08-00398-а.*

### Литература

1. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел. Под ред. А.В. Герасимова. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007.
2. Bless S.J., Rosenberg Z., Yoon S. Hypervelocity penetration of ceramics // Int. J. Impact Engng. – 1987. – №5. – P.165-171.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ КОЛЕЦ ИЗ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА В КРАНАХ С УПЛОТНЕНИЕМ ПО ШТОКУ**

Зайцев А.В., Злобин Н.Г., Исаев О.Ю.\* , Рогов Д.С., Смирнов Д.В.\* , Ханов А.М.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
г. Пермь, Россия*

*\*ООО «Силур», г. Пермь, Россия*

Терморасширенный графит (ТРГ) - уникальный материал, который вне зависимости от условий эксплуатации (повышенные температуры, термоциклирование, время контакта с агрессивными средами) обладает высокой термо-химической стойкостью, низким коэффициентом трения, высокими упругими свойствами. Уплотнительные кольца из ТРГ (УК) очень надежны, не требуют дополнительной герметизации при эксплуатации, работают при температурах до 560°C и давлениях до 40,0 МПа в кранах с уплотнениями по штоку. В настоящее время происходит интенсивное внедрение УК из ТРГ на предприятиях и промышленных объектах аэрокосмического, металлургического и химического комплексов, предприятиях энергетики и ЖКХ. Отработка УК из ТРГ на натуральных конструкциях и опытных образцах неоправданна вследствие высокого риска возникновения аварий, сопровождающихся серьезным ущербом. Поэтому большое значение приобретают методы математического моделирования, с помощью которых можно описывать поведение при эксплуатации, проектировать новые УК и их пакеты, оптимально соответствующие условиям нагружения узла.

Исследовались режимы работы изготавливаемых крупносерийными партиями УК, которые используются в кранах с уплотнениями по штоку. Предполагалось, что УК является толстостенным, ограниченным по высоте линейно упругим однородным трансверсально-изотропным цилиндром, зафиксированным в сальниковой камере нажимной втулкой (во всех точках наружной поверхности исключены радиальные, осевые и окружные перемещения). На одной из торцевых поверхностей было задано давление герметизации со стороны нажимной втулки, а на другой - рабочее давление. На внутренней боковой поверхности были заданы перемещения в осевом направлении, что моделировало возвратно-поступательное движение штока в условиях «приработки» в направлении нажимной втулки и в противоположную сторону. Квазистационарный режим работы уплотнения предполагал отсутствие уноса ТРГ, который моделировался заданием на поверхности контакта со штоком закона трения в виде условия пропорциональности радиальных и касательных напряжений. Для описанных выше условий на внутренней боковой поверхности толстостенного цилиндра были получены аналитические решения краевых задач и определены напряжения, деформации и перемещения в поперечных сечениях УК. Получено аналитическое решение задачи об износе ТРГ на внутренней поверхности УК при возвратно-поступательном движении штока.

Разработанная модель начального режима работы УК позволила получить новые численные решения краевых задач для отдельных колец и их пакетов методом конечных элементов, провести оценку начальной прочности по совокупности критериев с учетом различных механизмов разрушения, исследовать закономерности распределения независимых инвариантов тензора напряжений в точках поперечных сечений УК, входящих в пакет, при различных температурах и давлениях рабочей среды, различной толщине и количестве УК в сальниковой камере, различных режимах возвратно-поступательного (движение в сторону нажимной втулки и в противоположном направлении) и вращательного движения штока, а также различных

условиях на поверхностях контакта (трение, идеальное сопряжение или скольжение). Полученные из вычислительных экспериментов данные о местах расположения областей, в которых начинается разрушение ТРГ по различным механизмам, согласуются с результатами, наблюдаемыми при эксплуатации УК. Определены оптимальные давления герметизации, обоснованы рекомендации по внесению изменений в существующие конструкции пакетов УК, разработаны основы для создания методик уточненного прочностного анализа.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-Урал №11-01-96033).*

## **НЕУПРУГОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ОДНОНАПРАВЛЕННО АРМИРОВАННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ СЛУЧАЙНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ МНОГООСНОМ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ**

Зайцев А.В., Кислицын А.В., Соколкин Ю.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
г. Пермь, Россия*

Многослойные композитные конструкции проектируются таким образом, чтобы основная силовая нагрузка воспринималась волокнами, а связующее перераспределяло напряжения, обеспечивая взаимодействие между армирующими элементами. Каждый монослой находится в условиях сложного напряженно-деформированного состояния под действием осевых и сдвиговых нагрузок в продольных и поперечной плоскостях. Закономерности механического поведения монослоев могут быть определены при многоосных испытаниях образцов из однонаправленно армированных композитов с детальным анализом их микроструктуры на различных стадиях деформирования. Проведение подобных исследований требует уникального экспериментального оборудования и проводится в настоящее время только для наиболее простых схем нагружения. Поэтому разработка математических моделей микро- и макроразрушения однонаправленно армированных волокнистых композитов случайной структуры при комбинированном трехосном квазистатическом нагружении и сдвиге является актуальной задачей.

Разработана нелинейная двухуровневая модель неупругого деформирования и структурного разрушения однонаправленно армированных композитов случайной структуры, учитывающая совместное влияние различных условий нагружения в поперечной плоскости, однородного растяжения (сжатия) в направлении армирования и продольного сдвига, позволяющая описать частичную потерю и восстановление несущей способности элементами структуры при выполнении совокупности критериев разрушения. В представленной модели волокна предполагались линейно упругими, изотропными и неразрушаемыми, а матрица - изотропной, упруго-хрупкой. При численном решении краевых задач для представительных макрообъемов композитов (определены для первоначально неповрежденного материала при наличии идеального контакта на межфазных поверхностях) методом конечных элементов реализована процедура автоматического выбора шага нагружения, которая позволяет зарегистрировать каждый акт изменения деформационных свойств элементами структуры.

Определены масштабы неоднородности полей напряжений и деформаций в неповрежденном композите, отражающие многочастичное взаимодействие в ансамбле волокон и оказывающие решающее влияние на начальный этап образования дефектов. Для различных схем комбинированного трехосного пропорционального нагружения и сдвига определены закономерности эволюции дефектов в матрице, проанализировано влияние закона распределения диаметров волокон и «скрытых» параметров порядка стохастических структур на сценарии развития процесса разрушения. Вместе с тем, было обнаружено, что вид закона распределения (одномодальный симметричный или несимметричный) не влияет на эффективные упругие модули материала. Проанализированы условия регистрации макроразрушения однонаправленно армированного композита, как результата потери устойчивости процесса накопления повреждений. Показано качественное совпадение характера макроразрушения модельных композитов в вычислительных экспериментах с результатами

механического испытания на продольный сдвиг стеклопластика на основе эпоксидной матрицы. Обнаружен не зависящий от типа закона распределения диаметров волокон эффект «порционного» разрушения участков матрицы при гидростатическом сжатии.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ №11-01-00910).*



## **ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СЛУЧАЙНЫХ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В ВОЛОКНИСТЫХ, ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ И ВЫСОКОПОРИСТЫХ НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛАХ СТОХАСТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ И БИОКОМПОЗИТАХ**

Зайцев А.В., Кокшаров В.С., Соколкин Ю.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
г. Пермь, Россия*

Стохастический характер структуры неоднородных сред обусловлен случайностью формы, взаимного расположения и ориентации, разбросом характерных размеров частиц армирующего наполнителя или пор. Предложен новый метод аналитического построения условных и безусловных многоточечных моментных функций случайных полей напряжений и деформаций в однонаправленно армированных волокнистых, дисперсно-упрочненных материалах и высокопористых биокomпозитах, который позволяет записать выражения для этих функций в виде рядов с конечным числом членов [1]. Многопроцессорная реализация этого метода позволила вычислить условные и безусловные моментные функции искомых полей в представительных объемах и определить закономерности взаимодействия в ансамбле волокон стеклопластиков на основе эпоксидной матрицы ЭДТ–10.

При построении приближенных решений стохастически нелинейных краевых задач (например, полного корреляционного приближения), которые возникают при прогнозировании эффективных деформационных свойств и определении статистических характеристик полей напряжений и деформаций в компонентах композитов используются различные гипотезы о характере многочастичного взаимодействия в ансамбле включений или пор и аппроксимации моментных функций структуры и случайных полей второго, третьего, четвертого и пятого порядков. Производные этих функций в точках, соответствующих нулевым значениям аргументов, могут рассматриваться в качестве одного из возможных условий для верификации и отбраковки существующих и разрабатываемых моделей. В рамках полидисперсных моделей механики композитов для неоднородных материалов с круглыми в поперечном сечении сплошными и полыми волокнами и сферическими частицами, цилиндрическими туннельными или сферическими порами, окруженными слоем матрицы ненулевой толщины, получены выражения для условных и безусловных моментных функций, сформулированы и доказаны теоремы об общих свойствах, о значениях (величины обратно пропорциональны суммарному периметру или площади межфазных границ) и знаке производных (не зависит от объемного наполнения или пористости, направления, в котором ведется построение функций, и количества ближайших частиц армирующего наполнителя или пустот, определяющих координационное число структуры) и о локальной изотропии случайных полей напряжений и деформаций для случаев, когда включения, волокна или поры имеют различные или одинаковые радиусы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 11–01–00910).*

### Литература

1. Зайцев А.В., Кислицын А.В., Кокшаров В.С. Общие закономерности структуры, случайных полей напряжений и деформаций в волокнистых и дисперсно-упрочненных композитах // Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского. – 2011. – №4 (4). С.1485-1487.
2. Зайцев А.В., Кокшаров В.С., Соколкин Ю.В. Производные моментных функций второго порядка случайных полей напряжений и деформаций в однонаправлено армированных и дисперсно-упрочненных композитах / Неравновесные процессы в сплошных средах (НПСС–2009). Материалы Всероссийск. конф. молодых ученых. – Пермь: Изд-во ПГУ, 2009. – С.103-106.

## **ОЦЕНКА НАЧАЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ АНИЗОТРОПНОЙ КРЕПИ СФЕРИЧЕСКОЙ И ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ В МАССИВЕ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД**

Зайцев А.В., Кутергин А.В., Соколкин Ю.В., Фукалов А.А.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
г. Пермь, Россия*

Потребность в решении задач для тяжелых анизотропных сферических и тел обусловлена широким спектром приложений в различных отраслях промышленности, строительстве, геологии, на предприятиях нефте-газо-химического комплексов. Примерами могут служить задачи геомеханики хранения и добычи полезных ископаемых (монолитные крепи горных выработок), промышленного и дорожного строительства (облицовки туннелей), при решении которых необходимо учитывать центральную и осевую симметрию, равномерно распределенные внешнее и/или внутреннее давление. Получение новых аналитических решений важно и актуально для разработки инженерных методов уточненного прочностного анализа, для тестирования численных алгоритмов решения более сложных задач, в которых отдельные элементы конструкций и сооружений имеют аналогичную геометрию и граничные условия, а также для отработки методик эксперимента с тяжелыми телами простейшей геометрии.

Получены новые точные аналитические решения задач о равновесии составных толстостенных тяжелых трансверсально-изотропных тел с центральной симметрией и ортотропных тел с осевой симметрией [1-3], жестко закрепленных по внутренней или внешней поверхности и находящихся под действием равномерного внешнего и/или внутреннего давления. При интегрировании неоднородной системы уравнений Ламе в цилиндрических и сферических ортогональных координатах метод разделения переменных позволил понизить размерность задачи, а использование обобщенных степенных рядов – записать частное решение. Из полученных решений в частном случае следуют выражения для напряжений, деформаций и перемещений в точках полых и составных тяжелых изотропных сфер и цилиндров с аналогичными граничными условиями [4,5]. Рассмотрев монолитную железобетонную крепь сферической горной выработки и окружающий массив осадочных горных пород, как единую механическую систему, проанализировано влияние геометрии сооружений и свойств железобетона на характер распределения напряжений и перемещений в поперечных сечениях вдоль меридиональной и безразмерной радиальной координаты, проведена оценка начальной прочности на основе многокритериального подхода, описывающего различные механизмы исчерпания несущей способности, характерные для анизотропных материалов, и определены области, где это разрушение может быть инициировано.

### **Литература**

1. Зайцев А.В., Фукалов А.А. Упругое равновесие тяжелой трансверсально-изотропной толстостенной сферы с жестко закрепленной внутренней поверхностью // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – 2010. – №5(21). – С.85-95.
2. Фукалов А.А., Кутергин А.В. Точные аналитические решения задач о равновесии упругих анизотропных тяжелых тел с центральной и осевой симметрией и их приложения // Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского. – 2011. – №4 (4) – С.1485–1487.
3. Зайцев А.В., Кутергин А.В. Упругое равновесие тяжелых горизонтальных и вертикальных ортотропных цилиндрических тел / Неравновесные процессы в

- сплошных средах (НПСС–2009). Материалы Всероссийск. конф. молодых ученых. – Пермь: Изд-во ПГУ, 2009. – С.107-110.
4. Кожевникова Л.Л., Кузнецов Г.Б., Матвеев В.П., Шардаков И.Н. Аналитическое исследование упругого равновесия полый сферы, жестко закрепленной по внешнему контуру // Проблемы прочности. – 1974. – №9. – С.20-23.
  5. Кузнецов Г.Б. Упругость, вязкоупругость и длительная прочность цилиндрических и сферических тел. – М.: Наука, 1979. – 112 с.

## **АГРЕГАЦИЯ ЧАСТИЦ НАНОПОЛНИТЕЛЯ И ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ ДИСПЕРСНО-НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ**

Козлов Г.В., Султонов Н.Ж.<sup>\*</sup>, Яновский Ю.Г.<sup>\*\*</sup>, Микитаев А.К.<sup>\*\*\*</sup>

*Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,  
г. Нальчик, Россия*

*<sup>\*</sup>Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова,  
г. Москва, Россия*

*<sup>\*\*</sup>Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

*<sup>\*\*\*</sup>Закрытое акционерное общество "МАКПОЛИМЕР", г. Москва, Россия*

Изменения структуры аморфно-кристаллического полимера, реализуемые при введении дисперсного нанонаполнителя, приводят к снижению доли указанной структуры, в которой протекает пластическая деформация. Этот эффект определяет слабое и непропорциональное модулю упругости повышение предела текучести для этого класса полимерных нанокомпозиов. Предсказано резкое повышение предела текучести при подавлении агрегации частиц нанонаполнителя.

## **ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ДОБАВОК УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА КОМПЛЕКС СВОЙСТВ ЭЛАСТОМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Корнев Ю.В., Бойко О.В., Гусева М.А., Чиркунова С.В.

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

Углеродные нанотрубки являются перспективными объектами, позволяющими создавать материалы с принципиально новыми свойствами [1]. В настоящей работе поставлена задача исследования влияния углеродных нанотрубок на комплекс свойств эластомерных материалов на основе матрицы из сополимера бутадиена и стирола. В качестве исходных образцов были выбраны углеродные нанотрубки, синтезированные методом CVD в ИПРИМ РАН с применением катализаторов Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Полученные многостенные углеродные нанотрубки имеют длину более 2 мкм со средним наружным диаметром 20 нм. Электронные микрофотографии нанотрубок в режиме композиционного контраста показывают на наличие в них остатков катализатора. Углеродные нанотрубки полученные на катализаторах Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, вводились в эластомерную матрицу на основе сополимера бутадиена и стирола в количестве 0,3% по массе. Оценка свойств приготовленных эластомерных композитов проводилась в сравнении с ненаполненной матрицей. Полученные механические характеристики для эластомерных композитов наполненных углеродными нанотрубками показывают увеличение напряжений при удлинении, а также существенное увеличение прочности, в сравнении с исходной матрицей. При этом влияние на механические свойства оказывает и тип катализатора. Введение нанотрубок, полученных на катализаторе Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, приводит к снижению относительных удлинений, а на катализаторе Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, наоборот – к их увеличению. Присутствие остатков катализаторов (металлов переменной валентности) в структуре нанотрубок может приводить к изменениям в структуре вулканизационной сетки данных образцов, что подтверждается различными значениями tgδ в оптимуме вулканизации. При введении нанотрубок в эластомерные материалы, также отмечается снижение относительного гистерезиса, что особенно интересно в сочетании с увеличением удельной работы деформации на разрушение, модуля упругости и прочности полученных композитов в сравнении с исходной матрицей. Полученные данные для образцов наполненных микрошунгитом (40%), куда добавлялись нанотрубки, свидетельствуют о небольшом повышении прочности, а также увеличению относительного удлинения по сравнению с образцом без нанотрубок. Данный эффект достигается при введении нанотрубок 0,1% по массе и с увеличением содержания сохраняется на близком уровне.

Таким образом, введение небольших количеств углеродных нанотрубок (0,3% масс.), полученных методом CVD, в эластомерные матрицы на основе сополимера бутадиена и стирола позволяет существенно улучшить комплекс конструкционных и эксплуатационных свойств данных материалов. При этом важную роль играет химический состав катализатора, на котором получены углеродные нанотрубки.

### **Литература**

1. Микитаев А.К., Козлов Г.В., Заиков Г.Е. Полимерные композиты: многообразие структурных форм и приложений. – М.: Наука, 2009. – 278 с.

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ**

Корнев Ю.В., Бойко О.В., Чиркунова С.В.

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

Описание физико-механических характеристик материалов в наномасштабе позволяет изучать закономерности поведения их приповерхностных слоёв и субмикронных объёмов, кластеров. Это особенно актуально в свете развития нанотехнологий и, как следствие, непрерывного уменьшения размеров микромеханических и электронных компонентов, плёночных покрытий и т. д. Основным методом позволяющим определять физико-механические характеристики различных материалов и покрытий в наномасштабе в настоящее время является наноиндентирование, с помощью которого можно получать до двух десятков разнообразных механических характеристик материала [1, 2].

Суть метода заключается во внедрении геометрически и физически аттестованной алмазной пирамиды в образец и получении с высоким разрешением зависимости нагрузка – глубина индентирования (внедрение), а затем обработке полученных данных по методу Оливера-Фарра.

Исследования механических свойств эластомерных композитов а также покрытий на основе Al и Si проводились методом наноиндентирования на приборе NanoTest 600 в широком диапазоне нагрузок и внедрений. В данном эксперименте использовался «индентор Берковича» с углом при вершине  $65,3^\circ$  и радиусом закругления 200 нм.

В ходе эксперимента получены аномально высокие значения приведённого модуля упругости при малых внедрениях для широкого спектра эластомерных материалов наполненных различными наполнителями. При исследовании образцов из кремнийорганических эластомеров с минимальной шероховатостью поверхности установлено, что для ненаполненных эластомерных матриц также характерно существенное увеличение значения приведённого модуля упругости с уменьшением внедрения. Показано, что данный эффект для ненаполненных матриц проявляется в меньшей степени, чем в случае наполненных композитов и, видимо, связан с особенностью строения полимеров.

При исследовании методом наноиндентирования свойств покрытий (на основе оксидов алюминия и кремния) были получены значения приведённого модуля упругости до 170 ГПа. При этом, модуль упругости, полученный для алюминиевого сплава В95Т, на который и было нанесено покрытие составляет 75 ГПа. С помощью данного метода было установлено, что покрытие представляет собой материал с высокой степенью шероховатости и упругости и по упругим свойствам сравним с корундом.

Таким образом, показано, что механические свойства эластомерных композитов в наномасштабе существенно зависят от величины и скорости нагружения, а также от глубины индентирования. Установлена повышенная упругость покрытия на основе Al и Si на поверхности сплава В95Т.

### **Литература**

1. Головин Ю.И. Наноиндентирование и его возможности. – М.: Машиностроение, 2009. – 312 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КРУЧЕНИЯ ВЯЗКОУПРУГОГО ЦИЛИНДРА С УЧЁТОМ ЗАВИСИМОСТИ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Курбанов Наби Тапдыг оглы

*Сумгаитский Государственный Университет, г. Сумгаит, Азербайджан*

В работе изучается распространение крутильных волн в сплошном цилиндре с учетом тепловых воздействий и зависимостью свойств материала от температуры для произвольных наследственных функций.

Математически задача сводится к решению уравнения движения

$$\frac{\partial \sigma_{r\varphi}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{z\varphi}}{\partial z} + 2 \frac{\sigma_{r\varphi}}{r} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

с граничными и начальными условиями

$$\sigma_{z\varphi}(r, 0, t) = \sigma_0 f(r, t), \quad \sigma_{r\varphi}(r, z, t) = 0 \quad \text{при } r = 1$$

$$\sigma_{r\varphi}(r, z, t) \rightarrow 0, \quad \sigma_{z\varphi}(r, z, t) \rightarrow 0 \quad \text{при } z \rightarrow \infty$$

$$u_r(r, z, 0) = u_z(r, z, 0) = 0$$

$$u_r(r, z, 0) = \frac{\partial u_\varphi(r, z, 0)}{\partial t} = 0$$

Температурное поле описывается уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right)$$

Начальные и граничные условия для уравнения принимаем в виде

$$\theta(r, z, 0) = 0$$

$$\theta(r, 0, t) = \psi(r, t)$$

$$\theta(r, z, t) = 0, \quad z \rightarrow \infty, \quad \frac{\partial \theta}{\partial r} = 0, \quad r = 1$$

Определяющие соотношения между напряжением и деформацией имеют вид

$$\sigma_{r\varphi} = \int_0^t R(t' - \tau') de_{r\varphi}; \quad \sigma_{z\varphi} = \int_0^t R(t' - \tau') de_{z\varphi}$$

Задача решается преобразованием Лапласа и методом малого параметра.

Оригиналы найдены в виде свертки функций и показано, при больших значениях  $p$  (т.е. малых значениях времени). Решение затухает по экспоненциальному закону и обладает скачком на фронте волны.



## **ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО МИКРО-НАНОСТРУКТУРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ ЛОПАТКИ ГТД С УЧЕТОМ УСЛОВИЙ НАНЕСЕНИЯ**

Лепешкин А.Р.

*ФГУП “ЦИАМ им. П.И. Баранова”, г. Москва, Россия*

Для обеспечения работоспособности высокоэффективных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и установок (ГТУ) новых поколений необходима разработка теплозащитных композиционных покрытий (ТЗП).

Применение теплозащитных композиционных (керамических и жаростойких) покрытий для охлаждаемых лопаток является актуальным направлением совершенствования авиационных и энергетических газовых турбин. ТЗП защищают не только поверхность лопаток от высокотемпературной коррозии, но и материал лопатки от разупрочнения в результате воздействия высоких температур. Основную сложность в создании композиционного ТЗП для лопаток турбин представляет сочетание свойств керамики, расположенной на поверхности лопатки со свойствами промежуточного жаростойкого металлическим слоя, нанесенного на поверхность лопатки. Для рабочих лопаток турбин в настоящее время используется только электроннолучевая технология (ЭЛТ) нанесения керамического слоя. Это связано со значительными преимуществами такого слоя перед керамическими слоями, нанесенными газотермической плазмой.

Структура и свойства керамического слоя ТЗП полностью зависят от используемой технологии нанесения. Условия испарения и нанесения (конденсации) керамики определяются конструкцией и параметрами вакуумной установки с использованием ЭЛТ. Структура керамического слоя определяется температурой поверхности, на которой происходит конденсация пара, и условиями вращения лопаток в паровом потоке в камере установки. Исследовано влияние различных частот вращения и температуры подложки на структуру и свойства столбчатого микро-наноструктурного керамического покрытия на основе диоксида циркония. На основе анализа результатов исследований и расчета получены оптимальные параметры частоты вращения лопаток и температуры подложки для нанесения керамических ТЗП. Проведены дополнительные расчетные исследования напряженно-деформированного состояния конусно-столбчатой структуры керамического покрытия с учетом эксплуатационных факторов (центробежных и газовых сил) и температур, приводящих к появлению отдельных блоков и столбиков в ТЗП при возникновении термоусталостных трещин. Указанные исследования позволили уточнить параметры нанесения керамических покрытий на вращающиеся лопатки турбин в технологическом процессе.

## **ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ ОБОБЩЕНИЕ ВЯЗКОУПРУГОСТИ. НЕКОТОРЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В ПРОБЛЕМАХ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ОДНОРОДНЫХ И СТРУКТУРИРОВАННЫХ СРЕДАХ**

Лурье С.А.

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

Приводится замкнутый вариант расширенной термодинамики, которая строится вариационным методом в полном соответствии с методами механики деформируемых сред и является, по-существу, пространственно-временной теорией упругости. Формулируются определяющие соотношения, приводится вариационная формулировка модели для обратимых процессов и процессов с диссипацией. Показано, что, несмотря на то, что предлагаемая феноменологическая модель построена без привлечения гипотез Фурье и Дюамеля-Неймана, определяющие уравнения модели содержат и обобщенные соотношения закона Дюамеля-Неймана и неклассическое обобщение закона Фурье для теплового потока. Кроме того установлено, что обобщенное уравнение теплопроводности является обобщением уравнения Максвелла Каттанео. Один из главных результатов данной работы состоит в том, что обобщенное уравнение теплопроводности позволяет дать прогноз не только волновых свойств температуры, но нового канала передачи тепла в длинноволновом приближении. «Классическое» уравнение Максвелла-Каттанео не позволяет получить такой прогноз. Для подтверждения адекватности модели и правильности сделанных выводов дано также дискретное атомистическое моделирование процесса теплопередачи (совместно с проф. А. Гусевым). Сравнение континуального и дискретного моделирования показало поразительное совпадение теоретически полученных прогнозов и результатов численного моделирования.

Важным представляется и обобщение в расширенной термодинамике, связанное с описанием градиентных эффектов в обратимых и необратимых процессах. Показано, что использование градиентной модели стационарной теплопроводности позволило моделировать масштабные эффекты в задаче теплопереноса в неоднородных кристаллических структурах, а также эффект аномального локального изменения температуры в окрестности границ неоднородных сред (эффект Капицы). Развитая модель приводит к возможности моделирования терморезонансных явлений, открывает перспективы в области обоснованного экспериментального изучения масштабных эффектов в связанной динамической термоупругости, что особенно важно для микро- и наноструктурированных материалов. Приводятся примеры моделирования теплофизических характеристик композитов, дисперсно-армированных микро/нановключениями, а также волокнистых композитов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 09-01-00060), Программа Президиума РАН № 22.*

## **ЭФФЕКТЫ УВЕЛИЧЕНИЯ ДИССИПАТИВНЫХ ПОТЕРЬ В МНОГОФАЗНЫХ МАТЕРИАЛАХ С ВЯЗКОУПРУГИМИ МЕЖСЛОЙНЫМИ СТРУКТУРАМИ. ПРИЛОЖЕНИЕ К ДИСПЕРСНЫМ КОМПОЗИТАМ СО СФЕРИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ И К КОМПОЗИТНЫМ ВОЛОКНИСТЫМ СИСТЕМАМ**

Лурье С.А., Соляев Ю.О., Тучкова Н.П. \*, Лыкосова Е.Д.\*

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

*\*Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Российской академии наук,  
г. Москва, Россия*

Рассматриваются композиционные материалы, армированные включениями с вязкоупругими покрытиями. Показано, что оптимизируя толщину покрытий можно существенно повысить диссипативные характеристики композитов, и получить, в результате, многофазные материалы, эффективные демпфирующие характеристики которых существенно превышают диссипативные характеристики компонент.

Показано в результате предварительных теоретических исследований, что при сдвиге двухслойной полосы с тонким вязким слоем максимальная величина эффективного модуля потерь не зависит от абсолютной величины модуля потерь вязкоупругого слоя. Кроме того установлено, что эффективный модуль потерь при сдвиге более чем в три раза больше эффективного модуля при растяжении-сжатии поперек слоев и примерно в триста раз превышает модуль потерь вязкоупругого слоя. Установлено, что аномально высокие демпфирующие характеристики в армированных композитах с тонкими межфазными слоями определяются именно благодаря реализации в межфазных слоях деформаций сдвига с высокой амплитудой.

В работе получены аналитические соотношения для определения диссипативных характеристик композитов, армированных сферическими включениями с тонкими вязкоупругими покрытиями. Аналитические решения, определяющие в явном виде эффективный модуль потерь, получены также и для волокнистых композитов с волокнами, содержащими тонкие вязкоупругие покрытия, и для слоистых композиционных материалов на основе указанных волокнистых композитов. Здесь замкнутые решения были получены с помощью метода комплексных модулей упругости и процедуры определения эффективных упругих характеристик композиционных материалов, развитой Herve и Zaoui для композитов с многослойными сферическими включениями, и Christensen и Lo для многослойных волокнистых включений.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 09-01-00060), Программа Президиума РАН № 22.*

## **РЕШЕНИЕ СВЯЗНОЙ ЭЛЕКТРОТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ СТЕРЖНЯ ИЗ СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ, ИСПЫТЫВАЮЩЕГО ПРЯМОЙ ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД ПОСЛЕ НЕПОЛНОГО ОБРАТНОГО**

Мишустин И.В.

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

При пропускании электрического тока через образец из сплава с памятью формы (СПФ) в нем осуществляется связной электротермомеханический процесс, при котором все четыре явления – процесс деформирования, фазовый переход, изменение температуры и прохождение электрического тока влияют друг на друга и не могут в общем случае анализироваться независимо или последовательно. Электрическое сопротивление образца является интегральным параметром и меняется с изменением фазового состава и распределения температуры, что усложняет решение при заданной зависимости электрического напряжения, приложенного к образцу, от времени.

В рамках нелинейной модели деформирования СПФ рассмотрена задача о прямом и обратном мартенситных превращениях в стержне из СПФ, через который проходит электрический ток, при постоянной нагрузке. Допущения о том, что стержень имеет постоянное поперечное сечение, характерный размер которого значительно меньше длины стержня, теплообмен и передача электрической энергии могут происходить только через торцы, стержень находится в одноосном напряженном состоянии, температура по каждому сечению распределена равномерно, плотность тока во всех точках одинакова, позволяют свести задачу к одномерной по пространственным координатам. В результате подстановки в связное уравнение энергетического баланса СПФ выражений потенциала Гиббса двухфазного тела, определяющих соотношений для скоростей изменения нетермоупругих деформаций и зависимости объемной доли мартенситной фазы от температуры и механического напряжения получено разрешающее уравнение, имеющее вид уравнения теплопроводности со сложной зависимостью эффективной теплоемкости от температуры. Скорость притока к единице объема тела энергии немеханического происхождения выражена через силу тока и удельное электрическое сопротивление, для которого принята упрощенная линейная зависимость от температуры и объемной доли мартенситной фазы. В случае заданного электрического напряжения на торцах стержня разрешающее уравнение можно решать численно с итерационным уточнением зависимости силы тока от времени.

Проведены расчеты последовательности фазовых переходов в консольном стержне из равноатомного никелида титана, находящемся в состоянии однородного растяжения, с одинаковой начальной температурой во всех точках. На первом этапе в отсутствие электрического тока стержень либо охлаждается из аустенитного состояния через торцы до полного прямого перехода, либо нагружается в мартенситном состоянии при постоянной температуре. На втором этапе к торцам стержня прикладывается постоянное электрическое напряжение, вызывающее нагрев и обратный фазовый переход. Из-за низкой температуры торцев прилегающие к нему сечения остаются в мартенситном состоянии, средняя часть стержня со временем переходит в аустенит, а в промежуточных областях происходит неполный обратный переход. Далее на третьем этапе электрическое напряжение на торцах стержня снижается с постоянной скоростью, что вызывает прямой фазовый переход в сечениях, находящихся в аустенитном и двухфазном состояниях. В последнем случае использовались две альтернативные гипотезы о диаграмме фазового перехода. Для выяснения влияния выбора гипотезы на изменение температуры и смещения торца со

временем выполнены параметрические расчеты при разных скоростях уменьшения электрического напряжения и нагрузках. В каждом случае численно установлена сходимость решения.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ И ОГРАНИЧЕННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ В НИКЕЛИДЕ ТИТАНА

Мовчан А.А., Казарина С.А.

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

В [1,2] экспериментально установлено, что для сплавов с памятью формы характерно явление ограниченной ползучести, т.е. СПФ обладают реономными свойствами. Двойственным к свойству ползучести является эффект релаксации напряжений. В [3] такое явление было обнаружено в процессе исследования нагружения в режиме сверхупругости. Однако в [4] утверждается, что обнаруженный в [3] эффект является следствием не реономных свойств материала, а неизотермичности процесса, связанной с выделением или поглощением латентного тепла фазового перехода. В данной работе явление релаксации напряжений в равноатомном никелиде титана исследуется в условиях, когда фазового перехода не происходит, и проблем с поддержанием изотермического режима нет.

Образцы имели форму цилиндров диаметром 4 мм и высотой 6 – 12 мм и испытывались на сжатие. Перед испытанием образцы выдерживались в морозильной камере при температуре  $-27^{\circ}\text{C}$  для того, чтобы перевести сплав с памятью формы в полностью мартенситное состояние.

Испытания на сжатие проводили при комнатной температуре. По форме диаграммы  $\sigma - \varepsilon$  было установлено, что процесс нагружения происходит в мартенситном состоянии и сводится на микроуровне к структурному переходу в отсутствие фазового. В процессе испытаний образцы нагружались с фиксированными скоростями движения активного захвата 1 мм/мин., 0.1 мм/мин., 0.01 мм/мин. и 0.001 мм/мин. до различных значений напряжения  $\sigma_0$ , после чего деформация образца фиксировалась. Определялась зависимость усилий, действующих в образце, от времени в течение 40 мин.

Установлено существенное убывание напряжений со временем при постоянной деформации и температуре, которое может достигать до 15% исходного значения напряжений  $\sigma_0$ . Сразу после остановки испытательной машины скорость уменьшения напряжений велика, но постепенно с течением времени убывает. Чем больше скорость предварительного нагружения, тем интенсивнее идет процесс убывания напряжений. Таким образом, доказано существование явления релаксации напряжений в СПФ.

### Литература

1. Мовчан А.А., Тант Зин Аунг. Экспериментальное исследование и феноменологическое моделирование реономных свойств сплавов с памятью формы // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. – 2010. – Т.15. – Вып.3. – С.860-861.
2. Мовчан А.А., Казарина С.А., Тант Зин Аунг. Реономные свойства сплавов с памятью формы, проявляемые в опытах на мартенситную неупругость и сверхупругость // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2010. – Т.16. – №3. – С.305-311.
3. Lim T.J. McDowell D.L. Mechanical behavior of a TiNi shape memory alloy under axial-torsional proportional and nonproportional loading // J. Eng. Mater. Technol. – 1999. – Vol.121. – N1. – P.8-18.

4. Grabe C., Bruhns O.T. On the viscous and strain rate dependent behavior of polycrystalline NiTi // Int. J. Solids and Structure. – 2008. – Vol.45. – P.1876-1895.

## ДВЕ МОДЕЛИ РЕОНОМНОГО ПОВЕДЕНИЯ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

Мовчан А.А., Климов К.Ю.\*

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

*\*Московский Государственный Университет им. М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия*

Предложены две модели, описывающие реономные свойства сплавов с памятью формы (СПФ). В рамках первой модели [1] постулируется существование класса предельно-медленных процессов, которые могут быть описаны склерономными определяющими соотношениями. Предполагается, что эти определяющие соотношения могут иметь форму зависимости  $\varepsilon = \varphi(\sigma, q)$ , где  $\varepsilon$  - фазово – структурная деформация, являющаяся в общем случае функционалом истории изменения напряжений  $\sigma$  и параметра фазового состава  $q$ . Тогда для не слишком медленных процессов предлагается определяющее соотношение

$$\dot{\varepsilon} = f(\varphi(\sigma, q) - \varepsilon) \quad (1)$$

где  $f$  - монотонно возрастающая функция, удовлетворяющая условию  $f(0) = 0$ . В рамках модели (1) качественно правильно описываются характерные для СПФ явления ограниченной ползучести при мягком ступенчатом нагружении в режиме мартенситной неупругости и сверхупругости, уменьшение деформации со временем при постоянном напряжении при мягкой ступенчатой разгрузке в режиме сверхупругости, зависимость формы диаграммы  $\sigma - \varepsilon$  для мягкого (жесткого) изотермического монотонного нагружения от скорости нагружения (деформирования), эффект релаксации напряжений в случае выдержки при фиксированной деформации после монотонного нагружения в режиме мартенситной неупругости. Недостатком первой модели является тот факт, что в ее рамках отсутствует мгновенный скачек неупругих деформаций при скачкообразном изменении напряжений и асимптотика роста деформаций для малых времен при постоянном напряжении после его скачка является линейной, а не степенной, как это наблюдается в экспериментах.

В рамках второй модели предполагается существование двух классов склерономных процессов – предельно медленных и предельно быстрых, определяемых функционалом  $\varepsilon = \varphi_1(\sigma, q)$ . Для процессов, происходящих с промежуточными скоростями справедливы реономные определяющие соотношения вида

$$\dot{\varepsilon} = k \frac{\varphi(\sigma, q) - \varepsilon}{\varepsilon - \varphi_1(\sigma, q)} \quad (2)$$

Модель (2) в отличие от модели (1) описывает мгновенные скачки неупругих деформаций при достаточно больших скачках напряжений и дает правильную асимптотику изменения деформаций после скачка напряжений. В рамках предложенных моделей рассмотрены простейшие задачи устойчивости. Показано, что в некоторых случаях при нагрузке, меньшей длительной Эйлеровой реализуется режим динамической устойчивости.



## Литература

1. Мовчан А.А., Климов К.Ю. Моделирование реономных свойств сплавов с памятью формы. // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2011. – Т.17. – №2. – С.255-267.
2. Мовчан А.А., Тант Зин Аунг Экспериментальное исследование и феноменологическое моделирование реономных свойств сплавов с памятью формы // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. – 2010. – Т.15. – Вып.3. – С.860-861.

## **О ДИНАМИЧЕСКОМ ОЦЕНИВАНИИ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ СИСТЕМЫ НЕИЗВЕСТНОГО РАЗМЕРА СО СЛУЧАЙНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ**

Онищенко Д.Д.

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук,  
г. Москва, Россия*

На нескольких модельных примерах рассматривается процесс разрушения многоэлементной системы со случайными значениями прочности элементов при действии возрастающей внешней нагрузки. Классическим примером такой модели является пучок из геометрически идентичных волокон (пучок Даниэлса). Цель исследования заключается в изучении свойств случайного процесса, значениями которого являются размеры последовательных пакетов разрушений, т.е. наборов одновременно разрушающихся элементов системы. Модели разрушения изучаются в квазистатической постановке.

Обсуждается возможность получения по ходу разрушения системы статистических оценок времени, оставшегося до момента полного разрушения системы. При этом общее количество элементов системы предполагается неизвестным, а структура системы и закон распределения прочности элементов – известными. Изучаются статистические свойства последовательности пакетов разрушений и, в частности, последнего из них (лавины), соответствующего моменту полного разрушения системы. Оценки времени до лавины получаются на основании анализа текущих значений таких естественных характеристик развивающегося процесса разрушения, как средний объём зафиксированных пакетов, максимальный из объёмов зафиксированных пакетов, доли пакетов определённого (малого) объёма, средняя частота возникновения «больших» пакетов и др. Обсуждаются статистические свойства получаемых оценок, проводится сравнение известных теоретических результатов с результатами численных расчётов.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 11\_08-01243а.*

## **ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСА ПАРАМЕТРОВ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-АРМИРОВАННОГО КОМПОЗИТА**

Ошева И.Ю.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
г. Пермь, Россия*

Для контроля качества любого материала проводят механические испытания образцов на различные виды нагрузок. При этом необходимо, чтобы механические свойства, полученные на образцах одной партии, не сильно отличались друг от друга. На результаты измерений свойств образцов из крупноячеистых пространственно-армированных материалов оказывает существенное влияние множество параметров.

Данная работа посвящена численному моделированию эксперимента на сжатие призматического образца из пространственно-армированного композиционного материала крупноячеистой структуры. Изучено влияние условий нагружения образца и нагружающего приспособления на прочностные свойства образца при сжатии. Другим фактором, влияющим на напряженное состояние рассматриваемых крупноячеистых образцов, является случайное положение армирующего каркаса относительно граней образца при вырезке из припуска заготовки.

Для исследования влияния данных параметров применяется структурно-феноменологический подход. Для этого построена модель композита, для которого все элементы материала описываются явным образом.

Выявлена сильная зависимость напряженно-деформированного состояния как от коэффициента трения между опорными поверхностями образца и испытательной машины, так и от различного положения каркаса относительно граней образца.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №10-08-96062-р\_урал\_а, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (Госконтракт 16.740.11.0508).*

## **О ВЛИЯНИИ МАЛЫХ ВЕЛИЧИН В РАЗРЕШАЮЩИХ УРАВНЕНИЯХ НА КРИТИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ**

Сильченко Л.Г., Сильченко Т.Л.

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

Рассмотрены две хорошо известные классические проблемы о потере устойчивости упругой замкнутой круговой цилиндрической оболочки: 1) при равномерном сжатии вдоль образующей, 2) испытывающей равномерное кручение вокруг оси. Обе указанные проблемы давно решены различными авторами в самых разных постановках. Поэтому в настоящей работе основное внимание уделяется изучению влияния длины цилиндрической оболочки на её критические нагрузки сжатия и кручения соответственно, в контексте оценки вклада несущественных на первый взгляд малых слагаемых в разрешающих уравнениях, которые обычно предлагается отбрасывать при проведении вычислений, как малозначащие.

Критические характеристики потери устойчивости разыскиваются в рамках статического критерия устойчивости. В качестве базовой модели оболочки взята классическая модель Кирхгоффа-Лява. Помимо нее рассмотрены упрощённые модели оболочек, в которых не учитываются различные малые величины. В частности рассматривается модель пологой оболочки. Задача о выпучивании решается в линеаризованной постановке в рамках теории малых деформаций. Конечно, речь идет о верхней критической нагрузке.

В результате анализа различных решений для указанных задач устойчивости упругой цилиндрической оболочки, было показано, что отбрасывание, казалось бы, незначительных слагаемых, в формулах для погонных моментов не ведёт к существенным ошибкам, а в уравнениях равновесия — приводит к качественно неправильным результатам, по крайней мере, для достаточно длинных оболочек. Особенно отчётливо отмеченная тенденция проявляется в задаче о кручении оболочки. Это показывает, с какой осторожностью следует подходить к отбрасыванию малых величин.

Также показано, что при решении задачи об устойчивости оболочки при кручении вполне допустимо использование упрощённых соотношений, характерных для пологих оболочек. Это приводит к несколько завышенным, но качественно правильным результатам, если отбросить ветвь решения с формой потери устойчивости, имеющей одну полуволну в окружном направлении (сечение после выпучивания остаётся круглым). Этого нельзя сказать об аналогичной задаче устойчивости оболочки при сжатии, где подобный переход к уравнениям пологой оболочки приводит к неверным результатам практически во всём диапазоне длин.

Кроме этого применительно для скручиваемой оболочки, было проведено сопоставление найденных в работе решений, полученных с привлечением процедуры Галёркина на основе весьма подробных представлений для вариаций смещений, с известными классическими решениями, которое позволило по-новому взглянуть на некоторые общеизвестные результаты. В частности, рассматривается возможность другой трактовки отбрасывания той ветви решения, которой соответствует форма потери устойчивости с окружностью в поперечном сечении.

## **МЕТОДИКА ПРОГНОЗА ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕРМОУПРУГИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТНОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ SiC, АРМИРОВАННОЙ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ**

Соляев Ю.О., Лурье С.А., Касимовский А.А.\* , Иванова Д.Д.\*

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

*\*Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Российской академии наук,  
г. Москва, Россия*

В работе рассматривается композит на основе карбида кремния, армированный углеродными нанотрубками. Эффективные термоупругие характеристики композита рассчитываются в предположении, что нанотрубки концентрируются на границах керамики. Для их расчёта привлекаются прикладные варианты градиентной теории упругости и теплопроводности. Приводится пример расчёта элемента конструкции, указывающий на возможную перспективность использования подобных керамических материалов.

Стенки неохлаждаемых камер сгорания жидкостных реактивных двигателей малой тяги при эксплуатации нагреваются до максимально высоких для используемого конструкционного материала температур. Чем выше температура в камере сгорания, тем выше технические характеристики двигателя. Поэтому стоит задача разработки материалов, сохраняющие высокие прочностные характеристики при как можно более высоких температурах. Керамики являются перспективным классом высокотемпературных материалов. Известно, что армирование керамик углеродными нанотрубками (УНТ) приводит к увеличению как предела прочности на изгиб, так и трещиностойкости. В связи с этим представляет большой интерес исследование возможности применения армированных УНТ керамических композитов в качестве, например, конструкционного материала камеры сгорания ЖРД

В настоящей работе изучается деформирование исследуемого материала, находящегося в условиях стационарного силового и температурного воздействий, соответствующих эксплуатационным режимам типовой камеры сгорания ЖРД. Рассматривается нанокомпозит на основе карбида кремния с размером зерна 250 нм, армированный углеродными нанотрубками (SiC-УНТ). Эффективные физико-механические характеристики композита предлагается рассчитывать в рамках прикладных градиентных моделей теории упругости. В результате предлагается процедура прогноза эффективных характеристик керамического материала: модуля Юнга, модуля сдвига, коэффициента температурного расширения, коэффициента теплопроводности и предела прочности.

## **МЕТОДОЛОГИЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В АНИЗОТРОПНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ**

Формалев В.Ф., Кузнецова Ек.Л.

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
г. Москва, Россия*

На основе неявного метода градиентного спуска, разработана методология численного решения обратных задач для уравнений параболического типа со смешанными дифференциальными операторами, с использованием как аналитических решений прямых задач, так и разработанных новых численных методов.

Рассмотрены вопросы сходимости итерационного метода неявного градиентного спуска для функционала в виде квадратичной невязки экспериментальных значений потенциала, в которые заложены искомые параметры, и расчетных значений потенциала.

Доказана теорема о единственности решения обратной коэффициентной задачи на основе аналитического решения двумерной нестационарной задачи переноса потенциала. При этом существование методологии заключается в линеаризации функционала невязки относительно приращений искомых параметров обратной задачи.

Предложенная методология использована для разработки алгоритма решения обратных коэффициентных задач переноса потенциала, с использованием аналитических решений прямых задач для определения линейных искомых параметров. При этом матрица коэффициентов чувствительности определялась путем непосредственного дифференцирования по искомым параметрам от прямой начально-краевой задачи на рассматриваемом интервале потенциала.

*Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Президента РФ МК-309.2011.8.*

## СВЯЗНОСТЬ ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ И НАНОТРУБОК

Цициашвили Г.Ш., Лосев А.С.

*Институт прикладной математики Российской академии наук ДВО РАН,  
г. Владивосток, Россия*

В современных условиях быстро развивающейся нано научной отрасли, особое место занимают высокие требования, предъявляемые к надежной и стабильной работе создаваемых наноструктур, которая напрямую зависит от их связности (существование работоспособных путей, соединяющих любые две вершины).

Задача вычисления вероятности связности графа с ненадежными ребрами рассматривалась во многих работах, основанных на построении верхних и нижних оценок вероятности связности сетей общего вида, на использовании максимальных систем попарно непересекающихся разрезов или остовов, на ускорении алгоритмов вычисления коэффициентов полинома надежности.

Однако при рассмотрении наноструктур состоящих, как правило из большого числа элементов, задача существенно усложняется. Поэтому появляется необходимость в разработке новых удобных формул вычисления вероятности связности соединений при условии, когда рассматриваются структуры с большим числом высоконадежных элементов.

В настоящей работе получены асимптотические формулы для вероятности несвязности плоского графа общего вида с независимо работающими и высоконадежными ребрами. Эти формулы позволяют строить приближенные оценки вероятности несвязности для различных плоских графов, в частности, для сотовых структур, широко известных в нанотехнологиях, таких как гексагональная [графитовая плоскость](#). Последующие геометрические преобразования гексагональных структур, позволили получить, соответствующие асимптотические формулы для вероятности несвязности нанотрубки.

Полученные асимптотические формулы могут быть применены для вычисления вероятности несвязности нанотрубки, полученной в результате склеивания противоположенных краев гексагональной [плоскости](#) (рис.1).

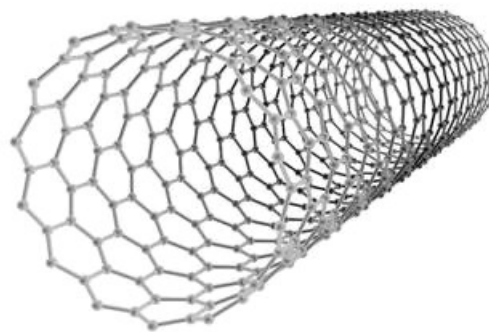


Рис.1. Нанотрубка.

Вероятность несвязности нанотрубки, изображенной на рис.1, будет определяться асимптотической формулой  $P \sim 28h^2$ ,  $h \rightarrow 0$ , где  $h$  - вероятность несвязности отдельного ребра. Эта формула может быть модифицирована применительно к неоднородной нанотрубке (в которой вероятность несвязности ребра  $w$  пропорциональна  $h$  с некоторым коэффициентом, зависящим от  $w$ ).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРО- И НАНОРАЗМЕРНОГО МИНЕРАЛА ШУНГИТ НА КОМПЛЕКС СВОЙСТВ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ ЭЛАСТОМЕРОВ

Чиркунова С.В., Корнев Ю.В., Бойко О.В., Яновский Ю.Г., Копылов В.М.\*

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

*\*ГНЦ РФ ГНИИХТЭОС, г. Москва, Россия*

Наибольший вклад в формирование эксплуатационных и конструкционных свойств эластомерных материалов (резин) вносят активные наполнители. С целью получения новых компонентов для эластомерных материалов, отвечающих современным экономическим и экологическим требованиям, определённый интерес представляет минерал шунгит.

Шунгит – минеральное вещество, состоящее из аморфного шунгитового углерода (30%), оксида кремния (60%), а также примесей неорганических веществ. Этот минерал обладает низкой стоимостью и высокой экологической безопасностью [1]. В качестве исходного продукта был взят минерал шунгит в виде порошка фракции 0-5 мкм производства «Карбон-Шунгит Трейд» и удельной поверхностью 20 м<sup>2</sup>/г. Также был взят измельчённый до наноразмеров (по разработанной в ИПРИМ РАН методике) минерал шунгит со средним размером частиц 40 нм и удельной поверхностью 58 м<sup>2</sup>/г. Измельчённый шунгит с преобладанием частиц наноразмеров вводился в эластомерные смеси на основе кремнийорганического каучука (СКТН-А) как единственный наполнитель в сравнении с исходной фракцией (0-5 мкм) шунгита и стандартным наполнителем – Sipermat360 (осаждённая кремнекислота, производства Evonik) в концентрациях 10, 20, 30, 40%.

Вязкость смесей, наполненных измельчённым минералом шунгит значительно выше вязкости смесей, наполненных исходным шунгитом и ниже вязкости смесей, наполненных sipermat360 во всем диапазоне наполнения. Прочность при разрыве отверждённой кремнийорганической композиции в оптимуме наполнения для исходного шунгита составляет 1,7 МПа, для измельчённого шунгита – 3,58 МПа, для Sipermat 360 - 2,85 МПа, прочность ненаполненной композиции составляет 0,49 МПа. Следует отметить, что для композитов, наполненных измельчённым шунгитом и Sipermat 360 получены близкие данные по сопротивлению раздиру, которые составляет порядка 7 кН/м. Результаты экспериментов на измерительном комплексе NanoTest 600 подтверждают тенденцию к увеличению упругости образцов с измельчённым шунгитом.

Таким образом, увеличение степени дисперсности минерала шунгит приводит к существенному увеличению его усиливающей способности. Показано, что применение измельчённого шунгита в качестве основного наполнителя в кремнийорганических эластомерных композитах позволяет улучшить технологические и физико-механические характеристики данных материалов.

### Литература

1. Филиппов М.М., Голубев А.И., Медведев П.В. Органическое вещество шунгитоносных пород Карелии (генезис, эволюция, методы изучения). – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1994. – 208 с.



## **РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ МЕЖДУ МОРФОЛОГИЧЕСКИ РАЗЛИЧНЫМИ ГРУППАМИ ФРАГМЕНТОВ, ОБРАЗОВАННЫХ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ УДАРНИКА НА ДИСКРЕТНЫХ ПРЕГРАДАХ**

Шумихин Т.А., Мягков Н.Н., Безруков Л.Н.

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*  
*\*ГосНИИАС, г. Москва, Россия*

Проведены эксперименты по изучению особенностей взаимодействия сферических алюминиевых ударников (диаметр 6.35 мм) со стальными сеточными преградами. Скорость соударения была в диапазоне 3.2 – 3.4 км/с. Толщина проволоки сеточных преград изменялась в диапазоне от 0.6 мм до 1.2 мм. Размер ячеек сетки изменялся в диапазоне от 2.6 мм до 3.2 мм.

В результате высокоскоростного взаимодействия ударника с тонкой дискретной преградой образуется облако фрагментов, структурно состоящее из двух частей: во-первых, это крупные фрагменты, образованные в результате ударно-волновых процессов в ударнике, оставляющие на поверхности свидетеля один или несколько крупных кратеров, и, во-вторых, это множество мелких фрагментов, сгруппированные в струи, оставляющие на поверхности свидетеля линейно-распределенные цепочки мелких кратеров. Образование выбросов, состоящих из мелких фрагментов, является результатом внедрения элементов сеточной преграды в материал ударника. Качественные свойства фрагментации ударников на сеточных преградах были изучены нами в работе [1].

В данной работе мы попытались количественно оценить распределение кинетической энергии между двумя группами таких фрагментов, построить зависимость этих распределений от веса сеточной преграды. Оценки производились по объему кратеров, образованных фрагментами ударника на алюминиевых пластинах-свидетелях. К первому типу фрагментации относились фрагменты, образовавшие на свидетеле центральную группу достаточно больших кратеров, ко второму типу фрагментации относились фрагменты, образовавшие группу линейно-распределенных кратеров.

Измерения показали, что суммарный объем всех кратеров на свидетеле уменьшается с увеличением веса сеток. Однако объем линейно распределенных кратеров при этом изменяется мало и даже имеет тенденцию к увеличению. Таким образом, можно говорить, что с увеличением веса сеток (а значит и с увеличением диаметра проволоки сетки) увеличивается та часть материала ударника, которая разрушается по механизму внедрения элементов сеточной преграды в материал ударника. Например, при весе сетки 1.7 кг/м<sup>2</sup> объем центральной группы кратеров превосходит объем линейно-распределенной группы кратеров в 4 раза, при весе сетки 5.2 кг/м<sup>2</sup> объемы кратеров этих групп одинаковы.

### **Литература**

1. Myagkov N.N., Shumikhin T.A., Bezrukov L.N. Experimental and Numerical Study of Peculiarities at High-Velocity Interaction between a Projectile and Discrete Bumpers // Int. J. Impact Engn. – 2010. – Vol.37. – P.980-994.

## **СВОЙСТВА ЭЖЕКТЫ, ГЕНЕРИРУЕМОЙ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПРОБИТИИ ТОНКИХ ЭКРАНОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Шумихин Т.А., Безруков Л.Н.\* , Мягков Н.Н.

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*  
*\*ГосНИИАС, г. Москва, Россия*

Высокоскоростное столкновение метеороида или частицы мусора с поверхностью космического аппарата (КА) производит эжекционные (вторичные) частицы, которые могут представлять опасность для внешнего оборудования КА. Кроме этого, как принято считать, эжекционные частицы являются одним из основных источников мелкодисперсного мусора в околоземном космосе. Эти два основных фактора обуславливают интерес к изучению свойств потоков эжекционных частиц.

В настоящем докладе представлен ряд экспериментов по изучению эжекты, возникающей при высокоскоростном взаимодействии ударника с тонкими экранами, изготовленными из различных конструкционных материалов. Тестировались материалы, которые используются как элемент конструкции защитного экрана КА, или рассматриваются как перспективные материалы для этой цели: алюминиевые пластины, стальные сетки или стопки сеток, неметаллические пластины из композитных материалов. 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 концентрируясь в индивидуальных струях, которые формируют конус.
2. Углы наклона струй имеют значительную дисперсию и зависят от толщины пластины: углы (взятые по отношению к линии выстрела) уменьшаются при увеличении толщины пластины.
3. Общая масса эжекционных частиц, полученная в экспериментах с алюминиевыми пластинами, существенно превышает общую массу эжекционных частиц, полученную в экспериментах со стальной сеткой той же удельной массы.
4. 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 количество эжекционных частиц получаемых в эксперименте со стеклопластиковыми пластинами велико.
5. Пробивная способность эжекционных частиц существенно выше в экспериментах с алюминиевыми пластинами, чем в экспериментах со стеклопластиковыми, хотя общее количество первых меньше чем вторых.

*Работа была поддержана грантом МНТЦ 3412.*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАГНЕТИТА, ПОЛУЧЕННОГО РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ, В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ**

Юмашев О.Б., Шалашилин А.Д., Гусева М.А., Густова Т.А.

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

Магнитные свойства наночастиц магнетита определяются несколькими факторами, главным из которых является метод их химического приготовления. Это влияет на свойства внутренней структуры кристалла, такие как размер и форма доменов, что определяет намагниченность магнетита.

Для исследований использовали образцы магнетита, полученные разными способами синтеза: на основе хлорида железа (II) и (III) (31); на сульфате железа (II) (42); на основе хлорида железа (III) и серноокислотного натрия (56) .

Образцы помещали в камеру прибора QD PPMS, где с помощью жидкого гелия создавалась необходимая температура. Постоянное магнитное поле варьировалось в интервале от +5 до -5 тесла. Этот цикл повторялся, для выявления возможного гистерезиса. Опыты проводили при температуре в 100, 200 и 300К.

Все три образца показали сходную корреляцию при начальных условиях, когда резко повышалась намагниченность силой поля. У образцов 31 и 56 рост намагниченности резко сократился после 0,5 етл, когда домены начинают выравниваться. У образца 42 этот процесс начался при более высокой намагниченности в 1,5 етл. Сила поля в обоих случаях составляла порядка 0,8 Т. Насыщенность завершалась на рубеже 1-1,5 тесла, где образец 31 показывал намагниченность в 0,8 етл, а образцы 42 и 56, соответственно, в 0,5 и 1,5 етл. Дальнейшее увеличение силы магнитного поля не влияло на величину намагниченности из-за насыщенности доменов.

В результате измерений все образцы показали хорошие магнитные свойства, не зависящие от изменений температуры.

## **ФРАКТАЛЬНОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ В МЕХАНИКЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ КОМПОЗИТНЫХ СРЕД**

Яновский Ю.Г.

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

Обсуждаются перспективы применения фрактального анализа для описания структуры и свойств дисперсно-наполненных нано- и микроразмерными частицами полимерных композитов. Большое внимание уделено таким специфическим для рассматриваемых сред вопросам, как структура и свойства межфазных слоёв и агрегация дисперсного наполнителя в полимерной матрице. Даются качественная оценка и физическая трактовка причин изменения свойств (усиления) полимерных композитов на различных масштабных уровнях при введении дисперсного наполнителя.

## **Секция 2**

# **Проблемы горения и детонации сложных сред**

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА НА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЕ В ХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ СЖАТИЯ

Битюрин В.А., Филимонова Е.А.

*Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,  
г. Москва, Россия*

Важное требование к современному двигателю - уменьшение концентрации оксидов азота в выхлопе. Одно из решений – использовать бедные топливно-воздушные смеси, т.к. уменьшается максимальная температура горения, и как следствие, концентрация оксидов азота тоже будет меньше. Однако такие смеси трудно поджечь, и их горение носит нестабильный характер (срыв пламени, скачки давления). Использование электрического разряда или лазерной искры способно решить эту проблему, если удастся зажечь разряд при повышенных давлениях.

Принцип работы химического реактора сжатия (ХРС) аналогичен принципу работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС). В ДВС особенно наглядно может проявиться низкотемпературное воспламенение, ответственное за стук в двигателе. Основа модели ХРС – макробаланс физических и химических величин, определяющих состояние газофазного рабочего тела. Модель состоит из кинематической модели системы цилиндр-поршень, модели системы газораспределения, включающая внешние системы ввода исходной смеси и вывода продуктов сгорания, модели физико-химических процессов в рабочем объеме цилиндра, с условием сохранения массы смеси в целом, массы отдельных компонентов и энтальпии смеси. При этом учитывается теплообмен со стенками. Таким образом, предлагается замкнутое описание характеристик рабочего тела, учитывающее наличие массо- и энергообмена между рабочим цилиндром и системами ввода-вывода компонентов рабочей смеси.

Возможность в принципе решить проблему стабильного воспламенения бедных смесей с низкой температурой подогрева можно осуществить, воздействуя на смесь электрическим разрядом в цилиндре вблизи верхней «мертвой» точки. Концентрации активных частиц – результат действия разряда при  $T=800\text{K}$ , была оценена в приближении заданного электрического поля, равного 200 Тд. Концентрации первичных веществ оценивались через константы скоростей соответствующих процессов диссоциации и

	$\alpha=1$	$\alpha=2$
T	2670 K	2026 K
P	61 Bar	44 Bar
W	28.5 kWt	17.2 kWt
NO	7500 ppm	30 ppm

возбуждения частиц прямым электронным ударом и энерговкладом на одну молекулу. Обработка разрядом вблизи верхней «мертвой» точки длилась 5 градусов, или приблизительно 280 мкс. Для этих условий в Таблице представлены результаты расчета для двух смесей (воздух + (90% $\text{C}_3\text{H}_8$ +10% $\text{C}_4\text{H}_{10}$ )) с разным избытком окислителя. Активация разрядом вблизи верхней «мертвой» точки производилась для случая  $\alpha=2$ . Без разряда смесь с  $\alpha=2$  и начальной температурой 450 K не зажигалась, температура выше 800K не поднималась, с разрядом -  $T=2026\text{K}$  и  $P=45\text{ Bar}$ . Видно, что для стехиометрической смеси ХРС более эффективен с точки зрения вырабатываемой мощности (28.5 и 17.2 кВт). Однако концентрация  $[\text{NO}]=7500\text{ ppm}$  очень большая, тогда как для бедной смеси  $[\text{NO}]=30\text{ ppm}$ .

## МЕТОД ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СВОБОДНЫЕ НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ВОЗДУШНЫЕ ВИХРИ: ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н., Горбачев М.А.

*Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,  
г. Москва, Россия*

Приведены результаты изучения воздействия препятствий в виде вертикальных сеток на динамику нестационарных воздушных вихрей, генерируемых в лабораторных условиях над нагреваемой подстилающей поверхностью. С помощью комплекса PIV, измерены поля скоростей, позволившие сделать оценку энергии модельных вихрей. На основании данных измерений, установлена зависимость некоторого комплексного геометрического параметра одиночного сеточного заграждения на величину предельной «энергетики» разрушаемых модельных вихрей. Проведено обобщение полученных данных по влиянию сеточных заграждений разной геометрии на модельные свободные вихри различной интенсивности (рис.1). Описаны физические основы воздействия развиваемого метода управления характеристиками вихрей, предопределяющие возможность его использования на практике.

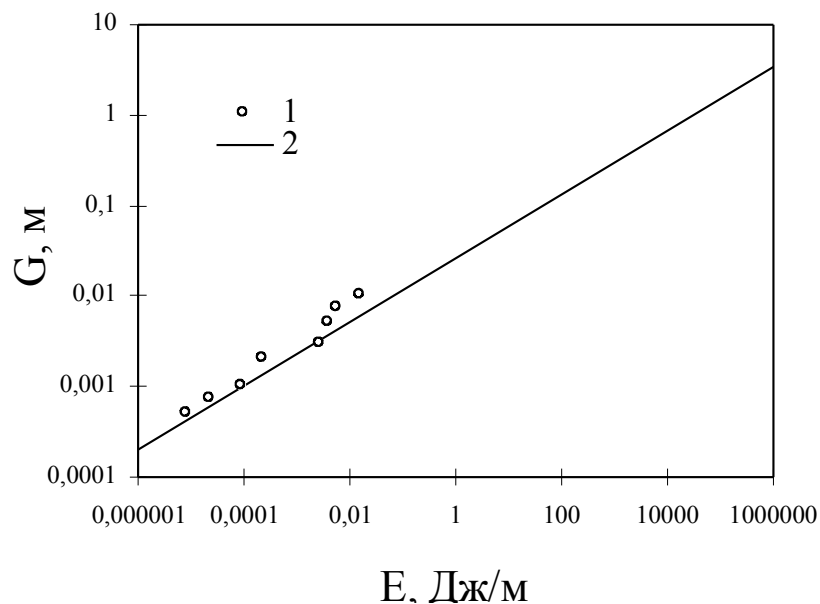


Рис.1. Влияние комплексного геометрического параметра одиночного сеточного заграждения на энергию разрушаемых модельных вихрей: 1 – экспериментальные данные; 2 – экстраполяция экспериментальных данных на вихри больших масштабов.

## О ГОРЕНИИ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ В СПУТНОМ ПОТОКЕ

Воротилин В.П.

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

Теоретически, без привлечения подгоночных констант и эмпирических корреляций, решается задача высокотемпературного горения турбулентной струи горючего газа в параллельном потоке окружающей среды окислителя - воздуха. Гидродинамика струйного течения описана на основе развитых в [1] представлений о крупномасштабном захвате внешней среды на границах струи. Дан вывод обобщенного уравнения баланса турбулентной жидкости (захвата внешней среды). Это уравнение явилось замыкающим уравнением для системы интегральных уравнений, описывающих гидродинамику и горение турбулентных струй. Учтены эффекты, связанные с наличием радиационного излучения, турбулентности внешней среды  $u_i$  и отличной от нуля скорости ее течения  $u_\infty$ , а также зависимости теплоемкости струи от состава и температуры. Рассчитаны различные варианты горения с учетом многообразия исходных данных истечения струи и ее взаимодействия с внешней средой. Приведенное на рис.1,2 сравнение некоторых из результатов теоретических расчетов с экспериментом подтвердило правомерность физических предпосылок предложенной теории.

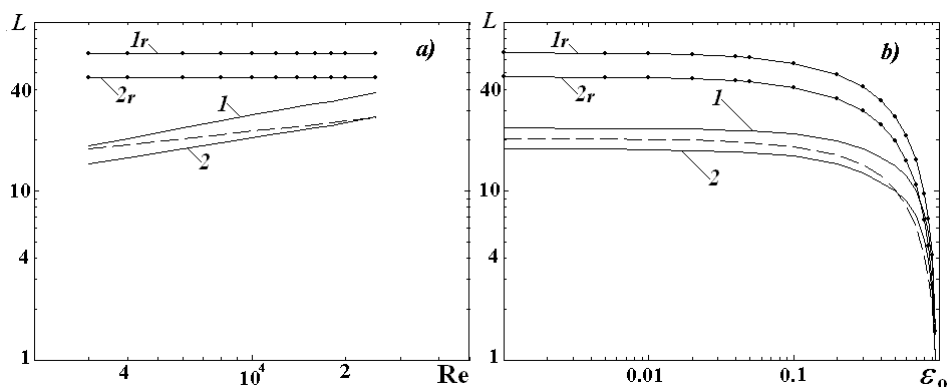


Рис.1. Безразмерная длина факела горения струи метана при  $u_\infty = 0$  (в неподвижной среде): на рис.1 *a* - как функция числа Рейнольдса при газосодержании инертной примеси  $\epsilon_0 = 0$ ; на рис.1 *b* - как функция  $\epsilon_0$  при  $Re = 6000$ . Сплошные кривые - расчет по уравнениям настоящей теории: кривые с номером 1 получены при  $T(L) = 800$  К; с номером 2 при  $T(L) = 900$  К; пунктирные - экспериментальная зависимость из [2]. Кривые  $1r$  и  $2r$  - расчет при тех же условиях, но без учета эффектов излучения.

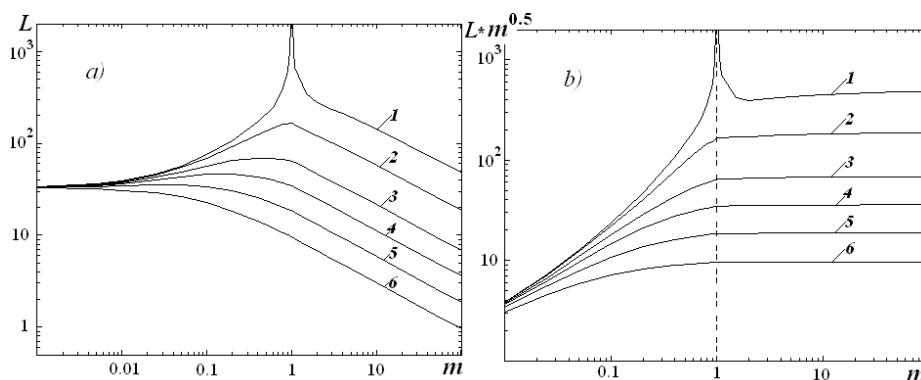




Рис.2. Кривые зависимости длины горения турбулентной струи метана  $L(m)$  от  $m = u_\infty / u_0$  при  $Re = 16000$  и  $\varepsilon_0 = 0$  и ряде значений параметра  $\xi_t = u_{t_\infty} / u_\infty$ : кривая 1-  $\xi_t = 0$ ; 2 – 0.003; 3 – 0.012; 4 – 0.025; 5 – 0.05; 6 – 0.1. На рис.2 *b* - кривые  $f(m) = L(m) * m^{0.5}$ , иллюстрируют корреляцию опытных данных зависимостью  $L(m) \sim m^{0.5}$  из [3].

### Литература

1. Великодный В.Ю., Воротилин В.П., Еремеев А.В., Никитенко Л.К., Яновский Ю.Г. Теоретическое и экспериментальное исследование газо-жидкостных турбулентных струй с закруткой / Сборник трудов ИПРИМ РАН “Современные проблемы механики гетерогенных сред”. – 2005. – Т.3.– С.368-377.
2. Полежаев Ю.В., Воробьев Б.А., Коровин Г.К. Экспериментальное исследование длины свободного диффузионного факела горючих газов, разбавленных инертными газами // ИФЖ. – 2010. – Т.83. – №2. – С.298-303.
3. Аннушкин Ю.М. Основные закономерности выгорания турбулентных струй водорода в воздушных каналах // ФГВ. – 1981. – Т.17. – №4. – С.59.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРОЦЕССЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ**

Голуб В.В., Володин В.В., Бакланов Д.И., Иванов К.В., Иванов М.Ф.,  
Кривокорытов М.С., Тарасенко И.Н.

*Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,  
г. Москва, Россия*

Одной из важнейших научных и технических задач, связанных с процессом горения, является исследование эффектов ускорения или торможения пламени, которые могут быть использованы для управления скоростью сгорания топлива, регулирования выхода продуктов сгорания во множестве приложений, требующих управления скоростью горения. Основным эффектом, вызываемым турбулизацией зоны горения – это увеличение площади поверхности пламени, что ведет к усилению таких ведущих для процесса горения факторов как теплопроводность и диффузия. Это, в свою очередь, приводит к усилению нелинейных процессов на фронте горения, дальнейшему развитию турбулентности и, в итоге, к значительному ускорению пламени, инициирующему переход от “медленного горения” (дефлаграции) к детонационному режиму горения. Одним из естественных путей гидродинамического влияния на область горения является воздействие акустическим полем. При этом эффект искривления фронта пламени зависит от частоты и проявляется ярче для коротковолновых воздействий. Таким образом, следует ожидать ускорения развитого пламени, находящегося в ультразвуковом поле, за счет увеличения турбулентности потока, что и было показано в работе Кумагаи, который отчетливо наблюдал увеличение скорости горения под действием ультразвука.

В первых работах коллективом авторов было численно показано существенное влияние акустики на форму и размер очага возгорания. Кроме того, в ходе исследований воздействия акустического поля на длину перехода горения в детонацию в потоке смешивающихся компонентов было продемонстрировано существенное увеличение длины, на которой происходит переход горения в детонацию, вследствие влияния сильного звукового поля.

В работах по исследованию влияния волн давления на начальную стадию распространения пламени в трубах различных длин было показано, что, взаимодействуя с волнами давления, пламя в трубе может как ускоряться, так и замедляться. Эксперимент по определению влияния акустики на скорость распространения пламени в круглых каналах показал, что при акустическом воздействии с частотой 40 кГц и уровнем звукового давления 120 дБ скорость распространения пламени заметно снижается. Однако явление зависит от энергии искры поджига, и при энергии поджига 0,46 Дж и больших эффект практически незаметен.

Помимо исследований влияния акустики на распространение фронта пламени в каналах и развитие очага воспламенения проводились эксперименты по определению влияния акустических колебаний на стационарные диффузионные пламена. Результатом исследований стало обнаружение режимов бифуркации диффузионного факела. При диаметре струи горючего газа (метана) 1,25 мм бифуркация наблюдается в широком частотном диапазоне 1,5 – 4,5 кГц. Также в результате исследований был обнаружен эффект снижения выхода токсичных продуктов горения под действием акустических колебаний. На резонансной частоте воздействия 3,0 кГц и уровне звукового давления 110 дБ концентрация сажи снижается на 30%, а концентрация NO<sub>x</sub> на 50%.

## **ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ НА НАНОМАСШТАБНЫЕ ПОТОКИ ВЕЩЕСТВА И ЭНЕРГИИ**

Каганович Б.М., Кейко А.В., Шаманский В.А., Зароднюк М.С.

*Институт систем энергетики им. Л.А.Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск, Россия*

В докладе обсуждаются возможности и методы использования созданной Б.М.Кагановичем, С.П. Филипповым и Е.Г. Анциферовым модели экстремальных промежуточных состояний (МЭПС) в равновесном термодинамическом анализе необратимых процессов горения с учетом кинетики переноса и обмена вещества и энергии в реакционных нанозонах. При этом соблюдаемое в ходе этих процессов равновесное состояние трактуется как состояние равенства движущих сил и сил сопротивления. Математические связи между законами консервативных и диссипативных систем, объясняющие допустимость такого использования, устанавливаются для стационарных процессов, имеющих место на ничтожно малых отрезках времени, соответствующих наномасштабам рассматриваемых реакционных объемов.

В решении на основе МЭПС конкретных задач используются исключительно методы математического программирования, которое авторами определяется как математическая теория экстремальных равновесных состояний. При поиске в области термодинамической достижимости из заданного исходного состояния точки с экстремальным значением интересующего исследователя свойства моделируемой системы предполагается, что рассматриваемая область обладает свойствами инвариантного многообразия. Поэтому при итеративном переходе в процессе вычислений от одного допустимого состояния к другому достаточно проверять монотонность изменения характеристической функции. Знания уравнения траектории не требуется.

Эффективность применения МЭПС иллюстрируется на примерах анализа сжигания и переработки топлив и загрязнения атмосферы энергетическими установками. При этом в моделях учитываются кинетические ограничения на перенос компонентов и тепловых нанопотоков в микронеоднородных областях реакционной среды и связанное с этим воздействие на устойчивость процесса горения и экологическую безопасность работы установки.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 09–08–00245а) и ОЭММПУ РАН (программа № 9 «Фундаментальные проблемы теплофизики и газодинамики в разработках высокоэффективных экологически чистых газопаровых энергоустановок нового поколения»).*

## **ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ГОРЕНИЕ КЕРОСИНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В СВЕРХЗВУКОВОМ КАНАЛЕ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ**

Левин В.А., Громов В.Г., Афолина Н.Е.

*НИИ механики Московского государственного университета  
им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

Разработана технология численного моделирования взаимодействия сверхзвуковых реагирующих потоков с газовыми разрядами, основанная на представлении разряда локальным источником энерговыделения заданной интенсивности и конфигурации. Применяется оригинальный комплекс программ интегрирования уравнений Навье-Стокса для различных моделей газовой среды с использованием созданных баз данных по термодинамическим, транспортным и кинетическим свойствам индивидуальных газов. Рассмотрена задача о воспламенении и горении керосино-воздушной смеси при локальном теплоподводе, моделирующем электрический разряд. Применяется модель газообразного керосина, включающая парафиновую и нафтеновую фракции с одной химической формулой  $C_{12}H_{24}$ , одинаковыми термохимическими свойствами, но различными кинетическими.

Исследовано сверхзвуковое турбулентное течение и получены данные по динамике температуры газа и состава газовой среды, позволяющие оценить нагрев смеси и скорость горения.

Проведен анализ стационарного и нестационарного воспламенения и горения, определено влияние мощности, расположения и конфигурации теплового источника на химические и газодинамические процессы, получены оценки характерных времен нагрева газа, воспламенения смеси и распространения пламени в канале.

Установлено, что полнота сгорания существенно зависит от расположения источника тепла и его мощности.

## **ФОРМИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ ЗА СЧЕТ ВНЕШНИХ СИЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В.

*НИИ механики Московского государственного университета  
им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

Попытки практического использования детонации в двигателях и других разнообразных энергетических устройствах поставили перед исследователями ряд проблем. Среди этих проблем представляется наиболее важной задача инициирования детонации в ограниченном пространстве. До настоящего времени не известны результаты экспериментальных и теоретических исследований по возбуждению детонации за счет вращения камер сгорания. Определенное отношение к рассматриваемому вопросу имеет одномерная задача об инициировании детонации поршнем.

Для оценки возможности инициирования детонации при вращении рассмотрено течение горючей смеси внутри и вне вращающегося эллиптического цилиндра, заключенного в круговой цилиндр. Определены значения критических параметров, при которых формируется детонация. Представлена аналогия с инициированием детонации в потоке горючей смеси в канале специальной винтовой формы. Исследование проводится в рамках одностадийной кинетики горения стехиометрической пропановоздушной смеси численным методом, основанным на схеме С.К. Годунова с подвижной расчетной сеткой. Получена детальная картина течения, позволяющая выявить особенности возникновения детонации при движении границ области, содержащей горючую смесь.

Проведено численное исследование инициирования детонации за счет вращения эллиптического цилиндра, заключенного в круговой цилиндр, заполненных стехиометрической пропановоздушной смесью, установлена возможность формирования детонации как внутри, так и вне эллиптического цилиндра. Обнаружено существование двух критических угловых скоростей вращения цилиндра, от которых зависит качественная и количественная картина течения. На базе гипотезы плоских сечений предложен способ оценки параметров в трехмерных каналах винтовой формы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 11-01-00068, 10-08-90039-Бел), Совета по грантам Президента РФ (НШ 8424.2010.1), Программ фундаментальных исследований Президиума РАН и ОЭММПУ РАН.*

## ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОТОКАХ БЕЗ ПОДВОДА ЭНЕРГИИ

Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В.

*НИИ механики Московского государственного университета  
им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

В работе рассмотрены задачи об инициировании детонации в сверхзвуковом потоке и неподвижной стехиометрической пропановоздушной смеси, заполняющей частично или полностью поперечное сечение плоского канала. Инициирование происходит за счет уступа или стенки, полностью перекрывающей канал. Исследование проводится в рамках одностадийной кинетики горения численным методом, основанным на схеме С.К. Годунова. Проведена классификация режимов течения и найдены критические значения параметров, разделяющие их. Обнаружен неизвестный ранее галопирующий режим слоистой детонации (рис.1) и дано объяснение его механизма.

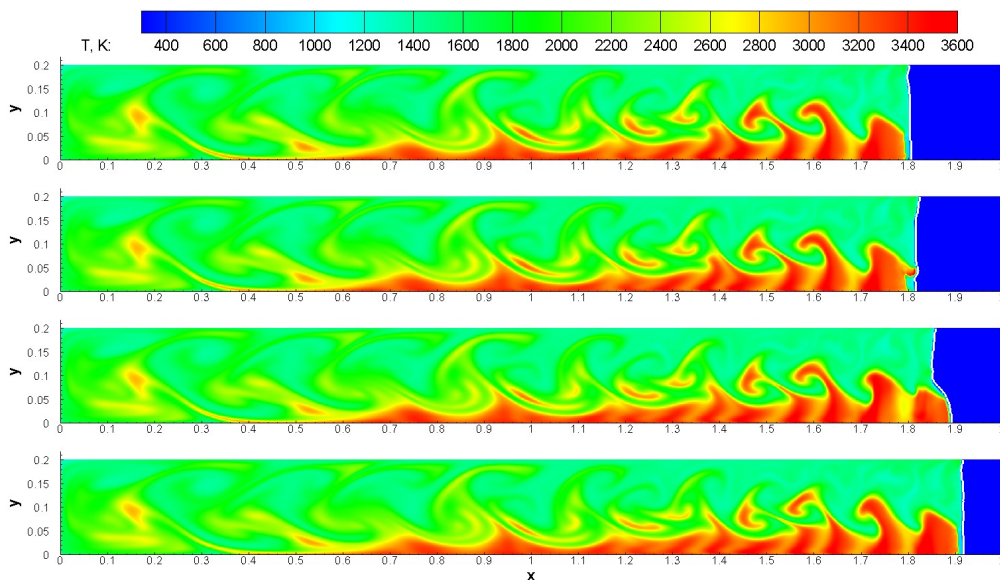


Рис.1. Поля температуры при галопирующей детонации в струе горючей смеси, набегающей на твердую стенку.

Рассмотрена задача об инициировании детонации в сверхзвуковом потоке пропановоздушной смеси в плоском канале постоянного сечения с изгибами за счет взаимодействия потока со стенками канала. Получены значения критической скорости потока и критического угла поворота канала, разделяющие различные режимы течения (в том числе стационарный с детонацией).

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 11-01-00068, 10-08-90039-Бел), Совета по грантам Президента РФ (НШ 8424.2010.1), Программ фундаментальных исследований Президиума РАН и ОЭММПУ РАН.*

## **ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ СОПЛА НА ТЯГОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТОНАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В.

*НИИ механики Московского государственного университета  
им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

Ранее авторы рассматривали рабочий цикл в рамках модели бесконечно тонкой детонационной волны. Рассматривалась задача, в которой в канале переменного поперечного сечения от закрытого конца распространяется бесконечно тонкая волна детонации. В классе конических и параболических стенок были найдены формы боковой поверхности, при которых достигаются максимальные значения тяги и удельного импульса при фиксированной массе горючего. В настоящей работе представлены результаты исследования подобной задачи с учетом конечной скорости протекания химических реакций в рамках одностадийной кинетики для горения пропановоздушной смеси. Получены полные картины развития течения и оптимальные формы каналов. Сравнение с результатами, полученными с использованием модели бесконечно тонкой волны детонации, показало хорошее соответствие.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 11-01-00068, 10-08-90039-Бел), Совета по грантам Президента РФ (НШ 8424.2010.1), Программ фундаментальных исследований Президиума РАН и ОЭММПУ РАН.*

## **АВТОКОЛЕБАНИЯ ПРИ ГОРЕНИИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА**

Полежаев Ю.В., Гешеле В.Д., Моргачев Н.Н., Раскатов И.П., Стоник О.Г.

*Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,  
г. Москва, Россия*

Рассмотрены случайные возмущения концентрации горючего при распространении волны горения, а также обрыв цепей при цепном механизме зарождения активных центров.

Проведено экспериментальное исследование вибрационного горения твердого топлива. Получены экспериментальные характеристики автоколебательного процесса акустического излучения при возникновении вибрационного горения. Разработаны и использованы методики диагностики условий возникновения автоколебательного процесса при горении твердого топлива. Предложена методика расчета горения фрагментов твердого топлива, омываемых пульсирующим газовым потоком.



## **Секция 3**

# **Аэро- и гидромеханика гетерогенных сред**

## РАЗРЫВЫ В СРЕДАХ С УСЛОЖНЕННОЙ ДИСПЕРСИЕЙ

Бахолдин И.Б.

*Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша Российской академии наук,  
г. Москва, Россия*

Исследуются структуры разрывов в средах с усложненной дисперсией, описываемые либо одним уравнением со старшими производными пятого и выше порядка либо системой уравнений с производными второго и третьего порядков. К таким моделям относятся многофазные и многокомпонентные среды: жидкость под упругой пластиной, жидкость с упругими прослойками, течение жидкости в упругих трубах, композитные материалы, электронная магнитная гидродинамика плазмы. Во многих случаях в качестве модельного уравнения удобно использовать обобщенное уравнение Кортевега-де Вриза.

$$a_t + b_1 a_x + c_n (a^2 / 2)_x + b_3 a_{xxx} + b_5 a_{xxxxx} = 0$$

Методы исследования первоначально обрабатываются на этом уравнении, а затем переносятся на более сложные модели.

Разработаны методы непосредственного расчета уравнений в частных производных и численно-аналитические методы, основанные на исследовании обыкновенных уравнений бегущих волн, позволяющие проверить расчеты. Под бездиссипативными структурами разрывов понимаются переходы между периодическими, двоякопериодическими или однородными состояниями. Волновые зоны описываются усредненными уравнениями. Под разрывами понимается разрывы в решениях усредненных уравнений. Решения задачи о распаде разрыва в бездиссипативном случае содержат волновые зоны, огибающая которых имеют автомодельный вид, т.е. зависит от  $x/t$ . В слабодиссипативном случае волновые зоны стационарны в некоторой системе координат наблюдателя.

На основе анализа условий эволюционности на разрыве и анализа корректности постановок задач на поиск решений определенного типа для обыкновенных дифференциальных уравнений, сделанный на основе рассмотрения линейных решений этих уравнений прогнозируются следующие типы разрывов: солитонный тип, разрыв с излучением, кинк, кинк с излучением, разрыв с двумя излучаемыми волнами. Данные типы структур разрывов действительно наблюдаются в решениях уравнений в частных производных. Для этих типов структур разработаны методы численного анализа обыкновенных дифференциальных уравнений, состоящие как в непосредственной вариации начальных данных, так и в нахождении этих структур как пределов солитонных последовательностей. Путем анализа солитонных последовательностей были выявлены и другие типы структур: переходы между периодическими и двоякопериодическими состояниями. Понять причины появления таких структур удастся в результате анализа картин бифуркаций двоякопериодических решений. Данные структуры являются резонансными в том смысле, что отношение периодов волн в них равно целому числу. Разрыв с излучением является частным случаем 1/1 резонанса. Такие структуры действительно наблюдаются при расчетах слабодиссипативных систем уравнений. Помимо описанных выше стационарных структур встречаются также периодические по времени и стохастические структуры.

*Работа поддержана грантом РФФИ №11-01-00034-а.*

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛН ТИПА ЦУНАМИ С ПОДВОДНЫМИ ПРЕГРАДАМИ

Бошнятов Б.В., Попов В.В., Левин Ю.К.

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

Работа посвящена исследованиям вопросов моделирования распространения и взаимодействия волн цунами с подводными преградами в большом гидродинамическом лотке ИПРИМ РАН. Показано, что скорость распространения длинной волны в гидродинамическом лотке, как и волн цунами в открытом океане, с приемлемой точностью описывается линейной теорией мелкой воды, если величина параметра нелинейности  $\frac{\xi_0}{H} \leq 0,1$  (натурное значение этого параметра для цунами составляет  $\approx 10^{-3} - 10^{-4}$ ). Приведены результаты исследований трансформации волны типа цунами (амплитудные коэффициенты отражения и прохождения волны) при её взаимодействии с различными (по высоте) препятствиями в виде затопленной и возвышающейся над уровнем воды плотины. При этом толщина препятствия (размер в направлении распространения волны) во всех экспериментах мала по сравнению с длиной волны  $d \ll \lambda$ . На рис.1 даны измеренные амплитудные коэффициенты отражения и прохождения волн типа цунами в зависимости от безразмерной высоты препятствия  $(H-h)/H$ . На том же рисунке приведен расчет амплитудного коэффициента прохождения волны, рассчитанный на основании линейной теории длинных волн.

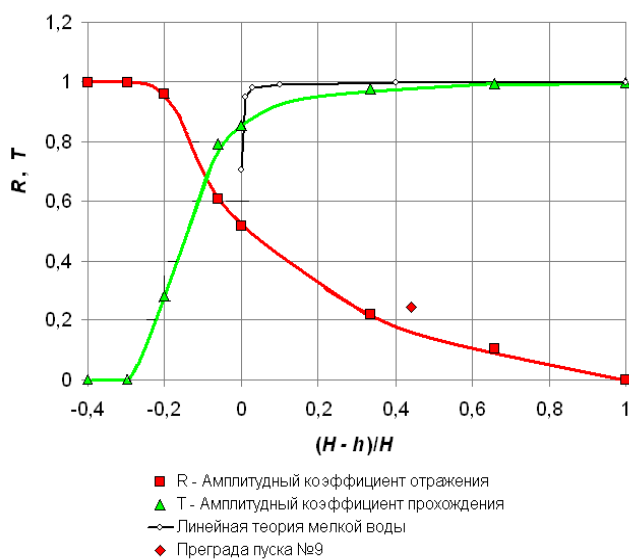


Рис.1.

Видно, что для подводных плотин, высотой почти до самого уровня моря  $h = 0,8 \cdot H$ , линейная теория длинных волн достаточно точно (с погрешностью менее 5%) описывает коэффициенты отражения и прохождения волны. Однако затопленные плотины практически не уменьшают (менее 10 %) амплитуду проходящей волны цунами. Важно отметить, что коэффициент прохождения волны не равен нулю до тех пор, пока высота препятствия не превысит уровень воды на величину большую, чем удвоенная высота падающей волны, т.е. условием полного отражения волны от

препятствия является:  $\frac{h-H}{2\xi_0} \geq 1$ . Эксперименты показали, что надводные, частично (на глубину  $h$ ) затопленные плотины имеют большую эффективность (преграда пуска №9 на рис.1). Сопоставление амплитудных спектральных характеристик падающей и отраженной от плотины волн выявило различное затухание в разных областях спектра. При этом максимум затухания, которое приблизительно соответствует графику рис.1, приходится на частоту около 0,1 Гц.

## АСИМПТОТИЧЕСКОЕ УСРЕДНЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ФИЛЬТРАЦИИ БРИНКМАНА В «ПОЛУПРОНИЦАЕМЫХ» СРЕДАХ

Волков-Богородский Д.Б., Власов А.Н.

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

В работе рассматриваются сложные структурно-неоднородные материалы, имеющие периодическую структуру. Предполагается, что материалы образованы периодической системой “полупроницаемых” трещин или цилиндрических пор, или периодической системой “полупроницаемых” включений сферической или цилиндрической формы. Здесь понятие “полупроницаемый” означает, что включения, каналы или трещины частично, или полностью заполнены материалом, подчиняющимся закону фильтрации Дарси. При этом имеется свободная часть области, в которой течение совершается по закону Бринкмана. В качестве типичной ситуации можно себе представить обтекаемые потоком вязкой несжимаемой жидкости частицы, которые окружены пористым материалом образованным цементационными связями, или же каналы/трещины частично закальматированы. В области свободного течения скорость жидкости и давление подчиняются уравнению Бринкмана. На границе свободного течения ставятся условия Биверса-Джозефа, на границе твёрдой фазы (если она есть) ставится условие полного прилипания.

Непосредственное решение такой фильтрационной задачи представляет собой весьма трудоёмкий процесс даже при условии использования современных компьютеров. В рассматриваемом случае регулярной периодической структуры полная система уравнений, описывающая физический процесс, трактуется как система уравнений Бринкмана с быстро осциллирующими коэффициентами. Поэтому для неё может быть произведён анализ решения на основе метода асимптотического усреднения Бахвалова. В рамках этого метода асимптотика решения задачи строится в виде разложений в ряд по целочисленным степеням малого параметра  $\epsilon$  ( $\epsilon \ll 1$ ), равного отношению размера ячейки периодичности к характерному размеру задачи. Асимптотика позволяет разделить глобальные процессы на уровне медленных переменных и локальные процессы на уровне быстрых переменных, и сформулировать последовательность задач на ячейке периодичности для функций быстрых переменных, которая позволяет точно описать процессы на микроуровне и определить эффективные характеристики глобальной среды (тензор проницаемости, поровое давление и т.д.).

Для решения последовательности задач на ячейке в случае обтекания включений был разработан специальный аналитико-численный метод, основанный на аппроксимации решения функциями формы, отвечающими всем условиям сопряжения на границах раздела фаз (свободное течение/пористая область/твёрдая стенка). Необходимые функции формы были построены в конечном виде с помощью векторных гармонических полиномов, соответствующих различным фазам материала. Конечный вид решения обуславливается применением обобщённого представления Папковича-Нейбера для давления и скоростей и специальной структурой вспомогательных потенциалов, основанных на введённых гармонических полиномах. Этот метод решения задач на ячейке позволяет с высокой точностью определить эффективные характеристики глобальной среды.

На основе полученных результатов было исследовано фильтрационное течение в пласте с микроструктурой полупроницаемых включений на основе уравнения Бринкмана и методики асимптотического усреднения.

## **К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЕРОВОДОРОДА ПО ГЛУБИНЕ ЧЕРНОГО МОРЯ**

Воротилин В.П., Кошоридзе С.И., Левин Ю.К., Полотнюк О.-В.Я.

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

Проблема поиска альтернативных источников энергии может быть отнесена к числу наиболее актуальных и перспективных. Для получения такого рода источников энергии пригоден водород, являющийся экологически чистым энергоносителем. Одним из возможных способов получения водорода может быть использование технологии его добычи из естественного природного сероводорода глубинных вод Черного моря. В настоящей работе с целью оценки энергетической эффективности извлечения сероводорода и прогноза экологических последствий проведено теоретическое исследование распределения сероводорода по глубине моря. Расчеты опираются на эксперименты [1-2]. В результате получены простые аналитические формулы, позволяющие найти расположение границы сероводородной зоны Черного моря и при заданной величине скорости генерации и поглощения сероводорода в море определить зависимость его концентрации от глубины, удовлетворительно совпадающее с экспериментальными данными. В работе также обсуждаются экологические последствия извлечения глубинных вод Черного моря на поверхность.

### **Литература**

1. S.G. Boguslavsky, L.K. Ivashchenko Vertical distribution of the hydrogen sulfide source in the Black Sea // Phys.oceanogr. – 1993. – Vol.4. – №3. – P.207-211.
2. Б.В. Борц, И.М.Неклюдов, О.В.Полевич, В.И.Ткаченко, Б.А.Шилиев Альтернативная сероводородная энергетика Черного моря. Состояние, проблемы, перспективы. Ч.1. // Альтернативная энергетика и экология. (ISJAEE). – 2006. – №12(44). – С.23-30.

## О ПРОБЛЕМЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ В ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ

Гуськов О.Б.

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

Проблеме гидродинамического взаимодействия частиц при их совместном движении в идеальной жидкости посвящено большое количество работ. Начало исследованиям в этой области было положено в конце 19 века в работах Хикса [1] и Бассета [2], получивших решение задачи о движении двух сфер. Переход к описанию движения трех и большего количества частиц оказался чрезвычайно сложной задачей. Как известно, проблема многих тел точно не решена до сих пор даже в классической механике. Это привело к необходимости построения разного рода приближенных методов. Одной из первых была предложена так называемая ячеечная модель, которая по сути сводит задачу многих тел к задаче о движении одной частицы внутри характерной для суспензии жидкой ячейки. Эта модель была использована Зубером [3] для определения присоединенной массы газовых пузырьков, образующих в идеальной жидкости безграничную невязкую суспензию. Впоследствии результат Зубера был уточнен в работах Вейнгаардена [4] и Фельдерхова [5] на основе физически более строгих моделей, учитывающей гидродинамическое взаимодействие пузырьков в суспензии.

В работе [6] на основе концепции самосогласованного поля был разработан новый метод решения задач о движении многих тел сферической формы в идеальной жидкости. Этот метод позволил получить ряд обобщений ранее известных результатов [7-9] по динамике частиц в невязкой суспензии. Кроме того, он оказался эффективным для решения того класса задач, которые ранее не рассматривались в рамках других методов из-за математических проблем принципиального характера.

Так, например, в работе [7] на основе данного метода была рассмотрена задача об относительном движении фаз и о присоединенной массе идентичных сферических частиц при их совместном движении в заданном потоке идеальной жидкости в присутствии плоской стенки. В первом приближении по объемной концентрации частиц дисперсной фазы получены простые аналитические выражения для средней скорости и присоединенной массы частиц при произвольном соотношении плотности частиц и жидкости.

В работе [8] на основе метода самосогласованных полей [6] разработан подход для решения отдельного класса задач о движении тел сквозь дисперсную среду. Рассмотрена задача о присоединенной массе сферического тела, движущегося в монодисперсной суспензии сферических частиц при произвольном соотношении размеров частиц и тела. В частности, показано, что уже при умеренных концентрациях частиц дисперсной фазы в случае, когда размер тела значительно превышает размер частиц, коэффициент присоединенной массы тела может отличаться от своего классического значения на величину порядка 10%.

Построенный метод применим также для решения широкого класса других задач динамики невязких суспензий.

### Литература

1. Hicks W.M. On the motion of two spheres in a fluid // Phil. Trans. – 1880. – Vol.171. – P.455-492.
2. Basset A.B. On the motion of two spheres in a liquid, and allied problems / Proc. London Math. Soc. – 1886. – Vol.18. – P.369-377.

3. Zuber N. On the dispersed two-phase flow in the laminar flow regime // Chem. Engng. Sci. – 1964. – Vol.19. – P.897-917.
4. Wijngaarden L. van. Hydrodynamic interaction between gas bubbles in liquid // J. Fluid Mech. – 1976. – Vol.77. – Pt.1. – P.27-44.
5. Felderhof B.U. Virtual mass and drag in two-phase flow // J. Fluid Mech. – 1991. – Vol.225. – P.177-196.
6. Струминский В.В., Гуськов О.Б., Корольков Г.А. Гидродинамическое взаимодействие частиц в потенциальных потоках идеальной жидкости // Докл. АН СССР. – 1986. – Т.290. – №4. – С.820-824.
7. Гуськов О.Б., Бошнятов Б.В. Гидродинамическое взаимодействие сферических частиц в потоке невязкой жидкости // Докл. РАН. – 2011. – Т.438. – №5. – С.626-628.
8. Гуськов О.Б. О присоединенной массе тела, движущегося в суспензии сферических частиц // Докл. РАН. – 2012. – Т.442. – №1. – С.50-53.
9. Гуськов О.Б. Присоединенная масса сферы в суспензии сферических частиц // ПММ. – 2012. – Т.76. – Вып.1. (в печати).



## **ВЛИЯНИЕ ОБЛАКА ИНЕРТНЫХ ЧАСТИЦ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ**

Федоров А.В., Кратова Ю.В.

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского  
отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия*

Численно исследованы процессы подавления детонации, распространяющейся в плоском канале, заполненном газозвесью мелких частиц алюминия в кислороде и облаком химически инертных частиц. Рассматриваются режимы плоской и ячеистой детонации. В обоих режимах влияние инертных частиц приводит к изменению детонационной структуры волны и ее скорости. Цель работы выявить влияние параметров инертной смеси (массовая доля частиц и их размер, распределение частиц по размерам в полидисперсной смеси), геометрических параметров облака (форма и размер облака, неравномерная концентрация инертных частиц) на характеристики детонации.

Физико–математическая модель для описания детонационных течений смеси мелких частиц алюминия в кислороде основана на принципах механики многоскоростного многотемпературного континуума и верифицирована на известных экспериментальных данных. В данной работе используется математическая модель бидисперсной гетерогенной среды, одна фракция которой реагирующая, а вторая инертная. Массовая доля реагирующих частиц алюминия является стехиометрической. В качестве инертных использовались частицы глинозема.

Для решения начально-краевой задачи применялся численный метод расчета, основанный на применении схемы TVD для газа и Джентри-Мартина-Дэйли для частиц.

Выполнено моделирование взаимодействия плоской детонационной волны, распространяющейся со скоростью близкой к Чепмена–Жуге, с полубесконечным облаком химически инертных частиц. Анализ результатов расчетов позволил описать механизм процесса подавления гетерогенной детонации с волновой точки зрения, выявить различные режимы течения: от непрерывного распространения до срыва детонации. Также было показано влияние объемной концентрации и диаметра инертных частиц на развитие течения. При конечных размерах облака инертных частиц определена его критическая длина, после которой процесс реиницирование невозможен.

Поскольку в реальности сложно получить облако частиц, равномерно распределенное на весь просвет канала, то представлялось полезным исследовать влияние «двумерности» течения. Здесь рассматривалось облако, у которого поперечный размер меньше высоты канала. Показано, что наличие очень узкого просвета (порядка 2–3 процентов) может приводить к увеличению критической длины инертного облака до 2 раз. Таким образом, облако инертных частиц, занимающее часть просвета канала, может приводить к формированию поперечных волн и переходу к режиму ячеистой детонации.

Ячеистый режим распространения детонации характеризуется наличием системы поперечных волн, что может играть значительную роль в задачах подавления детонации. Представляет интерес исследовать влияние присутствия в смеси инертных частиц на волновую структуру ячеистой детонации. Проведена серия параметрических расчетов при варьировании параметров инертного облака. Анализ результатов позволил выделить режимы распространения гетерогенной ячеистой детонации и ее подавления. Для обоих режимов плоской и ячеистой детонации определены

критериальные зависимости дефицита скорости детонации от массовой концентрации и размера частиц инертной фазы.

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫБРОСА УГЛЯ И ГАЗА С УЧЕТОМ МЕЖГРАНУЛЯРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ И ДЕСОРБЦИИ МЕТАНА**

Федоров А.В., Федорченко И.А.

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия*

В работе исследуется проблема внезапного выброса смеси частиц угля и газа в отработанное пространство в рамках двух подходов: (1) нестационарного неравновесного по скоростям и температурам и (2) нестационарного равновесного по скоростям подхода механики гетерогенных сред. В первом случае привлекаются математические модели, как с учетом, так и без учета межгранулярного взаимодействия частиц. Проведено сравнение полученных результатов с расчетными и экспериментальными данными, доступными из литературы. Анализ картин течения позволил определить закономерности в зависимостях скорости распространения волн разрежения и ударных волн от начальной концентрации частиц в смеси и их диаметра. Во втором случае (2) учитывается десорбция газа, находящегося в сорбированном состоянии на поверхности частиц угля. Описание проводится с привлечением двух изотерм сорбции — Фрейндлиха и Ленгмюра. Построено уравнение состояния смеси газа и частиц угля, принимающее во внимание десорбцию сорбированного газа. Численный анализ картин течения смеси при внезапном выбросе позволил определить закономерности в зависимостях скорости распространения волн разрежения и ударных волн от начальной концентрации частиц в смеси.

В рамках неравновесного подхода механики гетерогенных сред с учетом и без учета межгранулярного давления твердой фазы проведены расчеты задачи о внезапном выбросе угля и газа в одномерной нестационарной постановке. Выполнена верификация соответствующих математических моделей на основе литературных расчетных и экспериментальных данных, показано влияние гранулярного давления и величины энергии взаимодействия частиц на картину течения.

Выявлено критическое значение объемной концентрации частиц угля, которое характеризует немонотонную зависимость скорости распространения волны разрежения в слое частиц и ударной волны в газе в зависимости от их объемной концентрации, что обусловлено поведением равновесной скорости звука в смеси. Разрежение начальной плотности слоя за счет прошедшей ВР приводит к снижению скорости отраженной от стенки волны разрежения. Это обуславливает более длительный период поддержания интенсивности прошедшей в газ ударной волны на начальном уровне без ослабления ее догоняющей ВР.

В рамках математической модели с учетом явления равновесной десорбции показано, что при увеличении содержания твердых частиц и сорбированного газа в смеси давление газа в ней возрастает, что приводит к увеличению скорости волновых процессов и силы воздействия волны выброса на окружающую среду.

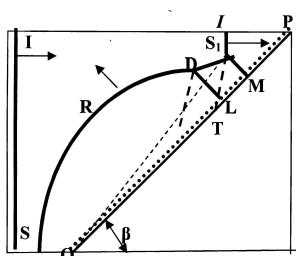
## МАХОВСКОЕ ОТРАЖЕНИЕ В ЗАДАЧАХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПАДАЮЩЕЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ВОЗДУХЕ С ПРИПОВЕРХНОСТНЫМ СЛОЕМ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ

Фокеев В.П.

*НИИ механики Московского государственного университета  
им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

При исследовании взаимодействия ударной волны, распространяющейся вдоль плоской поверхности, со слоем дисперсных частиц на ней [1-3], в некоторых случаях возникает необходимость перехода к более сильным ударным волнам, чем те, которые определяются возможностями экспериментальной установки. Увеличение интенсивности падающего ударного фронта реализуется при использовании режима маховского отражения падающей ударной волны на клине, когда по его поверхности распространяется маховский стебель трехударной конфигурации. Интенсивность его максимальна при больших значениях углов клина, близких к переходным к регулярному отражению, когда при отражении достаточно сильных падающих ударных волн наблюдается особо сложная картина течения с двойным маховским отражением [4, 5]. В этом случае на поведение слоя частиц влияет не только пограничный слой за маховским стеблем, с возможным переходом от ламинарного к турбулентному, но также контактная поверхность с большим градиентом скоростей, исходящая из первой тройной точки, и сильное возмущение (ударная волна), исходящее из второй тройной точки к отражающей поверхности клина, которое опережает место ламинарно-турбулентного перехода, в связи со сближением обеих трехударных конфигураций при переходе к регулярному отражению [6]. В данной работе анализируются параметры маховской конфигурации и, в особенности, особый характер эволюции ее высоты при отражении сильных ударных волн от плоского клина при углах близких к значениям перехода к регулярному отражению.

На рисунке представлена схема двойного маховского отражения. Падающая ударная волна **IS** распространяется слева направо, на клине с углом  $\beta$  происходит ее отражение и взаимодействие со слоем частиц на поверхности (линия точек **OP**), **IS<sub>1</sub>** -



падающая ударная волна, **S<sub>1</sub>** - первая тройная точка, **OS<sub>1</sub>** – (штриховая линия) траектория точки **S<sub>1</sub>**, **S<sub>1</sub>M** - маховский стебель (высота маховской конфигурации), **S<sub>1</sub>DR** - отраженная ударная волна, **S<sub>1</sub>T** - первая контактная поверхность, **D** - вторая тройная точка, **DL** - второй фронт возмущения (ударная волна). Необходимо отметить, что при переходе к регулярному отражению и при малых значениях высоты **S<sub>1</sub>M** воздействие слоя частиц на маховскую конфигурацию также представляет предмет исследования.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №11-01-00052а) и Роснаукой (проект НИШ - 8424.2010).*

### Литература

1. Бойко В.М., Папырин А.Н. // ФГВ. – 1987. – N2. – С.122-126.
2. Ван Бо-И, Осипцов А.Н. // Изв. РАН. МЖГ. – 1999. – N4. – С.61-73.
3. Wang B.Y., Xiong Y., Qi L.X. // Shock Waves. – 2006. – Vol.15. – N5. – P.353-373.
4. Баженова Т.В., Гвоздева Л.Г. Нестационарные взаимодействия ударных волн. – М.: Наука, 1977.

5. Баженова и др. Нестационарные взаимодействия ударных и детонационных волн, – М.: Наука, 1986.
6. Gvozdeva L.G., Bazhenova T.V., Fokeyev V.P. // Acta Astron. – 1976. – Vol.3. – P.131-140.

## **Секция 4**

# **Вычислительные методы механики наноструктурированных сред**

## **НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ВЯЗКОУПРУГИХ СРЕД В ПРОСТРАНСТВЕ СОСТОЯНИЙ**

Басистов Ю.А., Яновский Ю.Г.

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

В докладе рассматривается роль и место математической модели вязкоупругих сред в автоматической линии по производству вязкоупругих материалов с заданными физическими свойствами. Приводится структурная схема процесса идентификации модели. Схема состоит из управляемого процесса, модели вязкоупругой среды и алгоритма обучения с учителем, реализованного на ЭВМ в виде метода обратного распространения ошибки для сетей с прямой передачей информации, модернизированного применительно к сетям с обратными связями. В натурных экспериментах в качестве модели вязкоупругой среды использовалась динамическая нейронная сеть с обратными связями, ранее разработанная авторами и программно реализованная на ЭВМ. В качестве управляемого процесса использовался реотрон фирмы Хааке. В качестве вязкоупругих сред использовались эластомерные невулканизированные композиты на основе матрицы из натурального каучука, различные поликарбонаты, а также некоторые виртуальные математические среды.

Приводится алгоритм нелинейной динамической нейросетевой модели вязкоупругих сред в виде системы интегро-дифференциальных уравнений, основанных на нелинейных вязкоупругих элементах с ассоциативной и наследственной памятью, и на синаптических связях между этими элементами в виде интегральных операторов Вольтера. Этот алгоритм разработан авторами ранее и является обобщением известных моделей вязкоупругих сред, основанных на элементах Максвелла, Джеффриса и Фойгта-Кельвина. Из-за синаптических связей модель оперирует с релаксационной матрицей, а не с релаксационным спектром, как это реализовано в моделях К-ВКЗ, или в модели Вагнера. Релаксационный спектр в нашей модели реализуется главной диагональю симметрической релаксационной матрицы, а остальные элементы этой матрицы определяют взаимные релаксации синаптических связей между элементами. Эти связи могут быть как активными (эффект возбуждения), так и пассивными (эффект торможения).

В докладе приведены результаты численных экспериментов, в которых изучается зависимость качества обучения модели от количества и качества обучающего материала, а также исследуется способность модели к обобщению результатов обучения. Обучение осуществлялось алгоритмом градиентного спуска с возмущениями, который позволяет преодолеть локальные неровности поверхности ошибок и не останавливаться в локальных минимумах. Если параметр возмущения равен нулю, то изменение вектора параметров модели определяется только градиентом функционала ошибки. Если этот параметр равен единице, то текущий вектор параметров модели равен последующему.

## **НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРЫ: МНОГОУРОВНЕВОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ФОРМИРОВАНИЕ, ДИАГНОСТИКА СВОЙСТВ**

Вахрушев А.В., Липанов А.М.

*Институт прикладной механики Уральского Отделения Российской академии наук, г.  
Ижевск, Россия*

В докладе рассматриваются вопросы, связанные с проблемами создания различных видов наногетероструктур. Указанная задача включает три основных этапа: многоуровневое математическое моделирование физико - химических процессов в наногетероструктурах на нано -, мезо -, микро - и макроуровнях, формирование наногетероструктуры и диагностику физико-химических свойств.

Подробно рассмотрены основные задачи и проблемы моделирования физико - химических процессов в наногетероструктурах на нано -, мезо -, микро - и макроуровнях, методы моделирования и программные комплексы. Приведены результаты исследований для ряда задач: статическое и динамическое взаимодействие наноэлементов; исследование зависимости свойств наноматериалов от размерных факторов; динамика процессов поглощения, хранения и выделения водорода и углеводов наноматериалами; исследование процессов формирования композиционных наночастиц в наноаэрозолях; исследование закономерностей процессов роста и формирования структуры нановискеров; исследования структуры и кинетики образования химических связей металлических квантовых точек в кремнии; исследование структуры нанотечений, связь нано и макропараметров.

Представлены новые технические устройства для формирования наногетероструктур и методики диагностики их свойств, разработанные на основе многоуровневого математического моделирование физико-химических процессов в наногетероструктурах.



## **УСРЕДНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА В МАТЕРИАЛАХ СО СЛОИСТОЙ СТРУКТУРОЙ**

Власов А.Н., Волков Богородский Д.Б., Талонов А.В.\* , Саваторова В.Л.\*

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*  
*\*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия*

Распространение тепла в структурно сложных композитных средах моделируется краевыми задачами в виде уравнений в частных производных с быстро осциллирующими коэффициентами, характеризующими свойства отдельных компонентов материала. Непосредственное решение подобных задач представляет собой весьма трудоемкий процесс даже при условии использования современных компьютеров.

В случае композитов регулярной структуры быстро осциллирующие коэффициенты уравнений являются периодическими функциями, и математический анализ этих уравнений может быть проведён на основе асимптотического метода усреднения. В рамках метода асимптотического усреднения асимптотика решения задачи ищется в виде разложения в ряд по целочисленным степеням малого параметра  $\varepsilon$  ( $\varepsilon \ll 1$ ), равного отношению размера ячейки периодичности к характерному размеру задачи.

В данной работе с помощью метода асимптотического усреднения решалась задача теплопроводности в среде с периодической структурой. В рамках решения модельной задачи о распространении тепла в полубесконечной слоистой периодической среде были получены решения с учётом зависимости коэффициентов теплопроводности от температуры. Сравнение результатов численных расчётов с полученными аналитическими решениями показывает их хорошее совпадение.

Полученные результаты были использованы при расчёте распределения температуры в полубесконечной среде, представляющей собой ряд периодически чередующихся слоёв различной толщины. Для этого случая было найдено аналитическое решение усреднённой задачи на ячейке периодичности. Аналитические выражения были получены не только для главного члена ряда, определяющего температуру, но и для поправок более высокого порядка, что позволило учесть существенную неоднородность среды. Полученные выражения позволяют учитывать произвольное количество слоёв различных материалов любой толщины в пределах ячейки периодичности.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИИ ТВЕРДЫХ ВЯЗКОУПРУГИХ СРЕД ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ

Гасанов Аллахверди Биякир оглы, Курбанов Наби Тапдыг оглы, Бабаджанова Вусалия  
Гамза кызы

*Сумгаитский Государственный Университет, г. Сумгаит, Азербайджан*

Явление вязкоупругости определяется существованием временных эффектов, обусловленных действием ползучести и релаксации реальных материалов, рассматриваемых как твердые деформируемые тела. В линейной теории термовязкоупругости (ТВУ) связь между напряжениями  $\sigma_{ij}$  и деформациями  $\varepsilon_{ij}$  учитывает эту временную зависимость и в самом общем случае задается в виде линейного интегрального оператора:

$$\sigma_{ij}(\{x\}, t) = \int_0^t R_{ijkl}(\{x\}, t - \tau) d[\varepsilon_{kl}(\{x\}, \tau) - \alpha_{kl} \Theta(\{x\}, \tau)] \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ij}(\{x\}, t) = \alpha_{ij} \Theta(\{x\}, t - \tau) + \int_0^t \Pi_{ijkl}(\{x\}, t - \tau) d\alpha_{kl}(\{x\}, \tau) \quad (2)$$

Здесь  $R_{ijkl}$  и  $\Pi_{ijkl}$  - тензоры функций релаксации и ползучести соответственно,  $\alpha_{ij}$  - тензор температурного расширения вещества,  $\Theta$  - перепад температуры.

Подставляя напряжение по формуле (1) в уравнение движения

$$\sigma_{ij,j} - \rho F_i = \rho \frac{\partial^2 u_{ij}}{\partial t^2} \quad (3)$$

получаем систему из трех уравнений для определения перемещений

$$\frac{\partial}{\partial x_j} [A_{ij}\{u\} - B_{ij}\{\Theta\}] - \rho F_i = \rho \frac{\partial^2 \{u\}}{\partial t^2} \quad (4)$$

$A_{ij}\{u\}$  и  $B_{ij}\{\Theta\}$  интегральные операторы.

Пусть на части  $S_1$  поверхности  $S$ , ограничивающей рассматриваемое тело, заданы перемещения,  $u_{i0}$ , а на части  $S_2$  поверхности  $S$  - нагрузка  $T_{i0}$ :

$$u_i|_{S_1} = u_{i0}; \quad \sigma_{ij} l_j|_{S_2} \equiv [A_{ij}\{u\} - B_{ij}\{\Theta\}] l_j = T_{i0} \quad (5)$$

Тогда задача заключается в интегрировании уравнений (4) при выполнении граничных условий (5).

Поставленная задача решается с использованием температурно-временной аналогии применением преобразования Лапласа и методом малого параметра для произвольных наследственных функций.

## ПРИМЕНЕНИЕ РАЗНОСТНОЙ СХЕМЫ ДЛЯ РАСЧЕТА СТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ОДНОРОДНОГО СЖИМАЕМОГО ГАЗА В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Гахраманов П.Ф., Гаджиева Г.Ф.

*Сумгаитский Государственный Университет, г. Сумгаит, Азербайджан*

Для ламинарного течения сжимаемого теплопроводного газа в пограничном слое уравнения получаются из уравнений Навье-Стокса, аналогично тому, как это было сделано для случая несжимаемой жидкости.

Описание применения основной разностной схемы для расчета стационарных течений сжимаемого однородного совершенного газа проведем для системы уравнений в случае плоского стационарных течения, записанной в безразмерной форме:

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{dp}{dx}, \quad \rho u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{Pr} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial T}{\partial y} \right)$$
$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0, \quad p = \rho RT, \quad \mu = \mu(T)$$

Граничные условия для этой системы выберем следующие

$$u = v = 0, \quad T = T_N \text{ при } y = 0, \quad u = V_\infty(x), \quad T = T_\infty \text{ при } y \rightarrow \infty.$$

Для аппроксимации системы уравнений на плоскости  $(x, y)$  введем основную прямоугольную сетку  $x = x_0 + n\Delta x$ ,  $y = m\Delta y$ ,  $v, n = 0, 1, 2, \dots$  и вспомогательную «полуцелую» сетку  $x = x_0 + n\Delta x$ ,  $y = (m + 1/2)\Delta y$ ,  $x = x_0 + (n + 1/2)\Delta x$ ,  $y = m\Delta y$ .

Уравнение неразрывности аппроксимируется по четырехточечной схеме и из него находится значения поперечной составляющей скорости  $v_i^{n+1/2}$ . Уравнение разрешается относительно  $v_{m+1}^{n+1/2}$ , из нижнего граничного условия находятся  $v_0^{n+1/2} = 0$ , а затем находятся значения  $v$  во всех целых точках на полуцелом слое.

В силу того, что коэффициенты уравнений выражаются через искомые функции  $u, v, T$  на  $(n+1)$ -м слое, для нахождения окончательных значений этих функции необходимо применить итерации. В первой итерации в формулах значения искомых функций на  $(n+1)$ -м слое полагаются равными значениям соответствующих по номеру на слое точек. Итерации заканчивается, когда выполняются условия сходимости итераций с заданной точностью для функции  $u$  и  $T$ :  $\Delta u^* = \max_m |\Delta u_m| < 10^{-5}$ ,  $\Delta T^* = \max_m |\Delta T_m| < 10^{-4}$ .

Только после этого можно перейти к расчету следующего по  $x$  слоя.

Узловые точки пронумеруем в следующем порядке. Произвольным образом пронумеруем все узловые точки, находящиеся на прямой линии с максимальной ординатой и параллельные оси  $Ox$ , т.е.  $u_{1,1}, u_{2,1}, \dots, u_{N_1,1}$  (на I линии). Аналогично пронумеруем узловые точки на 2-ой линии, т.е.  $u_{N_1+1,2}, u_{N_1+2,2}, \dots, u_{N_2,2}$  и т.д. Предложим, что имеются всего  $p$  параллельных линий. Тогда на  $P$ -ой линии имеем следующую нумерацию узловых точек:  $u_{N_{p-1}+1,p}, u_{N_{p-1}+2,p}, \dots, u_{N_p,p}$ .

Следовательно, для регулярных и нерегулярных узловых точек имеем следующие нумерации:  $u_{1,1}, u_{2,1}, \dots, u_{N_{p,p}}$ . Тогда алгоритм итерации Зейделя будет иметь вид:

$$u_{n,m}^{(i)} = \sum_{k=1}^{n-1} a_{nk} u_{k,m}^{(i)} + \sum_{k=n+1}^{N_p} a_{nk} u_{k,m}^{(i-1)} + f_{n,m} \quad (n = \overline{1, N_p}, m = \overline{1, p}),$$

Выберем точное решение данного уравнения следующим образом:

$$u(x, y) = (x^2 + y^2)^{1/4} \sin\left(\frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{y}{x}\right) + x^2 + y^2.$$

Решается соответствующая разностная задача на компьютере методом итерации Зейделя, и полученный результат сравнивается с точным решением.

## ВЫЧИСЛЕНИЕ КОНСТАНТ И КОЭФФИЦИЕНТОВ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВА НА НАНОУРОВНЕ

Гелиев А.В., Егоров Б.В., Маркачев Ю.Е., Семенов В.Н. Петров Ю.В.\*

*ФГУП “ЦАГИ”, г. Жуковский, Россия*

*\*Институт теоретической физики им. Л.Д.Ландау Российской академии наук,  
г. Черноголовка, Россия*

Для описания процессов, происходящих в твердом веществе, жидкости, газе, плазме необходимо учитывать эффекты квантовой и наномеханики. Важной составляющей исследования является вычисление констант и коэффициентов, характеризующих поведение вещества на наноуровне.

В работах авторов вычислены такие характеристики и константы, как колебательные частоты в кластере  $(\text{H}_2\text{O}) - \text{Al}^+$ , зависимость колебательной теплоемкости кластера  $(\text{H}_2\text{O}) - \text{Al}^+$  от температуры, определение количества адсорбированных молекул и димеров воды на единицу площади поверхности алюминия, зависимость поверхностной плотности мономеров и димеров воды от температуры и давления (от 1 до 10 атм), определение химического потенциала нанотрубки, а также корреляционные зависимости и вириальные коэффициенты для ряда благородных и молекулярных газов. На основе квантово-химических расчетов получены значения энергии диссоциации, вращательные константы, температуры межмолекулярных колебательных мод кластеров.

Для расчета электропроводности углеродной нанотрубки был использован метод сильной связи, в рамках которого трубка типа «zigzag» рассматривалась как квазиодномерный кристалл. Из условий равенства количества электронов зоны проводимости и количества дырок валентной зоны; равенства химического потенциала и кулоновского интеграла и равенства значений дырочного и электронного токов были вычислены электрическая проводимость и сопротивление нанотрубки. Зависимость сопротивления трубки от температуры позволяет сделать вывод о полупроводниковом характере проводимости. Для трубок  $(n,0)$  при  $n$  кратном 3 сопротивление имеет значение порядка килоом в диапазоне температур от 100К до 300К, что дает возможность использовать нанотрубки в качестве нагревательных элементов поверхности для плавления тонкой прослойки льда – одного из традиционных способов борьбы с обледенением ЛА. Полученные результаты предсказывают, что покрытие металлической поверхности углеродными функционализированными нанотрубками способно сдвинуть начало обледенения в область более низких температур примерно на 10°C.

Физическое моделирование процесса обледенения металлической поверхности выполняется посредством обдува ее потоком холодного влажного воздуха в натуральных испытаниях, или в климатических камерах.

### Литература

1. A.V. Geliev, Kh.D. Do, B.V. Egorov, Yu.E. Markachev, K.B. Tereshkina, D.M. Shogin, V.I. Khromov. “The Correlation Dependence of the Critical Reynolds Number of the Laminar-Turbulent Transition on the Equilibrium Constant of Dimerization in a Gas”// Russian Journal of Physical Chemistry. – 2011. – Vol.5. – N1. – P.124-130.
2. Гелиев А.В., Егоров Б.В., Маркачев Ю.Е., Семенов В.Н. К построению квазихимической кластерной модели газа. Ухта. – УГТУ. – 2011.

## **КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОЧАСТИЦ И НАНОСИСТЕМ**

Заводинский В.Г.

*Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного  
отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Россия*

В докладе обсуждается применимость методов молекулярной динамики с классическими потенциалами, полуэмпирических методов и квантово-механических методов *ab initio* к моделированию наночастиц и наносистем, и в частности к исследованию их механических свойств. Делается вывод, что, несмотря на внешнюю привлекательность классического подхода (простота, наглядность, возможность изучения частиц с числом атомов до  $10^6$ , возможность исследования температурных эффектов), подобные исследования создают лишь иллюзию получения научных результатов, поскольку классические потенциалы, в силу своей жесткости, а зачастую и физической некорректности, неспособны правильно описать атомные взаимодействия в наночастицах и наносистемах. В лучшем случае, они могут описывать взаимодействие атомов в гетерогенных бездефектных кристаллах, да и то — вдали от поверхности, и совершенно не способны описывать атомную структуру и энергетiku наночастиц. Более достоверные результаты получаются с помощью полуэмпирических методов, в которых наряду с эмпирическими параметрами частично используются квантово-механические вычисления. Наиболее информативны расчеты, проводимые неэмпирическими (*ab initio*) методами, опираясь только на квантовую механику. В частности, в докладе даются рекомендации по использованию методов функционала электронной плотности и псевдопотенциала, которые прекрасно зарекомендовали себя при моделировании как объемных кристаллических тел, так и в задачах квантовой химии, и в исследовании свойств наночастиц.

В докладе излагаются результаты моделирования наночастиц различной природы и с различными типами межатомного взаимодействия (алюминий, кремний, диоксид циркония, карбид вольфрама), обращается внимание на расчеты такой важной характеристики, как модуль упругости, и на ее отличия от характеристик объемных материалов.

Специальное внимание уделено исследованию наносистемы, представляющей собой так называемый твердый сплав, и состоящей из наночастиц карбида вольфрама, связанных между собой нанопрослойками кобальта. Обнаружено, что малые частицы (содержащие менее 15 атомных пар WC) обладают кубоподобной структурой типа NaCl, более крупные частицы характеризуются тригональной симметрией, при которой внутренняя атомная структура частиц сохраняет свойственный для NaCl характер чередования атомов W и C. Показано, что модуль Юнга наночастиц в несколько раз превышает модуль Юнга массивного карбида вольфрама. Прочность наночастиц на разрыв также существенно превышает прочность массивного материала. Вакансии снижают прочность наночастиц, однако атомы кобальта, внедряясь в вакансионные позиции, могут восстанавливать прочность наночасти почти до величин, характерных для бездефектного случая. Показано, что с уменьшением толщины прослойки кобальта между кристаллитами карбида вольфрама до наномасштабных размеров прочность ее на поперечный разрыв увеличивается вдвое, но модуль сдвига уменьшается в шесть раз. При этом твердость прослоек может в 3-4 раза превосходить твердость массивного кобальта.

## **ВЛИЯНИЕ ТИПА КАТИОНА НА СТРУКТУРУ МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЫ TiO<sub>2</sub>/ЭЛЕКТРОЛИТ: МД МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Кисленко С.А., Амиров Р.Х., Самойлов И.С.

*Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,  
г. Москва, Россия*

В работе методом молекулярной динамики (МД) исследовано влияние типа катиона на структуру электролита, формирующегося на поверхности нанокристаллов TiO<sub>2</sub>. Полученные данные используются для определения механизмов, за счет которых тип катиона влияет на эффективность солнечных элементов, сенсibilизированных красителем [1].

В работе рассматривается электролит на основе ацетонитрила, содержащий соль йода с варьируемым катион Li<sup>+</sup>, тетрабутиламмоний (TBA<sup>+</sup>), 1,2-диметил-3-пропилимидазол (DMPIM<sup>+</sup>). Рассчитаны распределения катионов Li<sup>+</sup>, TBA<sup>+</sup>, DMPIM<sup>+</sup>, а также аниона I<sup>-</sup> (в зависимости от типа катиона) вблизи поверхности нанокристалла TiO<sub>2</sub>.

Показано, что независимо от типа катиона на поверхности TiO<sub>2</sub> формируется плотный адсорбционный слой из молекул ацетонитрила, препятствующий сближению с поверхностью как катионов, так и анионов электролита на расстояние, меньшее ~0.6 нм. Адсорбционный слой, по-видимому, играет роль защитного барьера, препятствующего рекомбинации фотоэлектронов.

Вычислен профиль потенциала на границе фаз TiO<sub>2</sub>/электролит. Найдено, что в зависимости от типа катиона скачок потенциала на границе фаз растет в последовательности Li<sup>+</sup><DMPIM<sup>+</sup><TBA<sup>+</sup>, что коррелирует с экспериментальными данными о влиянии типа катиона на напряжение холостого хода солнечного элемента [2].

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №10-08-01123).  
Вычисления выполнены на суперкомпьютере МВС-100К (МЦЦ РАН).*

### **Литература**

1. Кисленко С.А., Амиров Р.Х., Попель О.С., Самойлов И.С. Солнечные элементы, сенсibilизированные красителем: современное состояние и перспективы развития // Теплоэнергетика. – 2010. – Т.57. – №11. – С.58-65.
2. Shogo Nakade, Taisuke Kanzaki, Wataru Kubo, Role of Electrolytes on Charge Recombination in Dye-Sensitized TiO<sub>2</sub> Solar Cell (1): The Case of Solar Cells Using the I<sup>-</sup>/I<sub>3</sub><sup>-</sup> Redox Couple // J. Phys. Chem., B. – 2005. – Vol.109. – P.3480-3487.

## **ПОЛУЧЕНИЕ ТОЧНЫХ РЕШЕНИЙ НЕОДНОРОДНОГО УРАВНЕНИЯ БЮРГЕРСА НА ПРИМЕРЕ ЗАДАЧИ ОБ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ В СОПЛЕ ЛАВАЛЯ**

Кудрявцев А.Г., Сапожников О.А.\*

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

*\*МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, г. Москва, Россия*

Уравнение Бюргерса является одним из эталонных нелинейных уравнений математической физики, оно описывает целый ряд различных по своей природе физических явлений. В частности, в нелинейной акустике уравнение Бюргерса используется для описания распространения одномерных акустических волн конечной амплитуды в условиях проявления диссипации. При наличии в среде источников уравнение Бюргерса модифицируется и принимает вид неоднородного уравнения. В данной работе рассмотрено неоднородное уравнение Бюргерса с правой частью специального вида, которое описывает распространение нелинейной акустической волны навстречу околосвуковому потоку в трубе с участком уменьшенного сечения (сопле Лавалья). В докладе описывается метод нахождения точных решений неоднородного уравнения Бюргерса на основе преобразования Дарбу. Показано, что однократное преобразование Дарбу переводит однородное уравнение Бюргерса в неоднородное уравнение, соответствующее задаче о сопле Лавалья. Базируясь на точных решениях однородного уравнения Бюргерса, для задачи о потоке в сопле выписаны все возможные регулярные стационарные решения и исследован характер эволюции нестационарных решений. Указан алгоритм многократного применения преобразования Дарбу. Отмечено, что этот алгоритм многократного преобразования Дарбу фактически позволяет дискретно уменьшать коэффициент вязкости среды.



## НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ВОЛНЫ В ЗАПОЛНЕННОМ УПРУГОЙ СРЕДОЙ ПСЕВДОКОССЕРА ШАРЕ

Лай Тхань Туан, Тарлаковский Д.В.

*Московский государственный авиационный институт (национальный  
исследовательский университет), г. Москва, Россия*

В сферической системе координат рассматривается сплошной шар с центром в точке  $O$  и радиусом  $R_0$ , заполненный линейной однородной изотропной средой псевдокоссера ( $\omega = 1/2 \operatorname{rot} \mathbf{u}$ , где  $\mathbf{u}$  и  $\omega$  - векторы перемещения и угла поворота). На поверхности шара заданы осесимметричные нормальные и касательные перемещения, а также угол поворота. В начальный момент времени возмущения отсутствуют.

Уравнение движения при отсутствии массовых сил имеет вид [1]:

$$\rho \ddot{\mathbf{u}} = \mu \Delta \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{u} + 1/4 (\gamma + \varepsilon) \operatorname{rot} \operatorname{rot} \Delta \mathbf{u}, \quad (1)$$

где  $\rho$  и  $\lambda$ ,  $\mu$  - плотность и упругие постоянные Ламе среды;  $\gamma$  и  $\varepsilon$  - дополнительные физические характеристики среды;  $\Delta$  - оператор Лапласа; точками обозначены производные по времени  $\tau$ .

Поле перемещений представляется в виде потенциальной и соленоидальной частей:  $\mathbf{u} = \operatorname{grad} \varphi + \operatorname{rot} \psi$ . Искомые функции раскладываются в ряды по полиномам Лежандра и Гегенбауэра. К полученным начально-краевым задачам относительно коэффициентов рядов применяется преобразование Лапласа по времени с параметром  $s$  (индекс « $L$ » соответствует изображению, а нижний индекс – номерам членов рядов):

$$\Delta_n \varphi_n^L - s^2 \varphi_n^L = 0, \quad \frac{\eta + \xi}{4} \Delta_n^2 \psi_n^L - \frac{1 - \kappa}{2} \Delta_n \psi_n^L + s^2 \psi_n^L = 0. \quad (2)$$

Решения уравнений (2) выражаются через модифицированные функции Бесселя первого и второго рода полуцелого индекса  $n + 1/2$  соответственно с аргументами  $rs$ ,  $r\sqrt{\lambda_1(s)}$  и  $r\sqrt{\lambda_2(s)}$ , где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  - характеристические числа второго уравнения с неотрицательной действительной частью. Изображения коэффициентов рядов нормального, касательного перемещений и угла поворота находятся с использованием их связи с потенциалами. Поскольку вычислить оригиналы изображений непосредственно не представляется возможным, то строится их асимптотика в окрестности начального момента времени. Для этого применяются разложения изображений в ряды по экспонентам и в ряды Лорана в окрестности бесконечно удаленной точки.

Приводятся примеры расчетов, в которых используется конечное число членов асимптотических разложений.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ.*

### Литература

1. Новацкий В. Теория упругости. – М.: Мир, 1975. – 872 с.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ МЕХАТРОННЫМ КОМПЛЕКСОМ ЭКСТРУЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛИМЕРОВ**

Малафеев С.И., Сагиров С.Н.\*

*ООО «Компания «Объединенная Энергия», г. Москва, Россия*

*\*ООО «Орион», г. Москва, Россия*

Повышение эффективности экструзионного производства пластмассовых изделий осуществляется в настоящее время на основе совершенствования технологического оборудования и его автоматизации с использованием новых прогрессивных технических средств и алгоритмов управления.

В работе рассмотрены модели движения и преобразования полимера при экструзии, ориентированные на анализ и синтез систем управления. При моделировании процессов в одношнековом экструдере использованы следующие допущения: отдельные твердые частицы ведут себя подобно сплошной среде; твердая пробка находится в контакте со всей стенкой канала, то есть поверхностью цилиндра, телом шнека, активной стороной нарезки и пассивной стороной нарезки; глубина канала постоянна; твердая пробка движется как поршень; зазором между выступом нарезки шнека и цилиндром можно пренебречь. Материал в шнеке перемещается в одном направлении в результате движения поверхности шнека относительно поверхности цилиндра. Скорость движения полимера в твердой фазе в значительной мере определяется силами, действующими на границах твердых поверхностей. При любом движении со скольжением, когда действуют силы трения, происходит выделение тепла.

Для управления процессом разработана адаптивная системы с идентификатором состояния и визуализацией движения полимера. Решение уравнений движения полимера выполняется методом конечных элементов и методом сеток. Визуализация процесса выполнена с использованием библиотеки OpenGL. Для ускорения расчета и отображения использованы возможности аппаратного 3D ускорения, которое поддерживается практически на всех современных видеоадаптерах. Для ускорения вывода информации о температуре, 3D модель дискретизируется, для каждого модуля задается температура, далее накладывается градиент, с помощью которого происходит усреднение цветовой гаммы. Таким образом, не требуется выполнять вычисления значения для каждой точки. В процессе визуализации игнорируются скрытые объекты модели, что используется при выводе информации о давлении в системе, которая производится с помощью векторов.

Система управления реализована на основе традиционной двухуровневой структуры. Первый уровень составляют электроприводы пресса и тянущего устройства, локальные регуляторы температуры, контроллеры отрезного устройства, дозатора и коммутационных аппаратов, второй уровень – пульт оператора, представленный промышленным компьютером и монитором с сенсорным экраном.

Рассмотренная система управления линией прошла в 2010-2011 гг. опытную эксплуатацию в ООО «Владимирский завод полимерного машиностроения «Полимер-Техника», г. Владимир. Разработана документация для серийного производства.

## УПРУГО-ПОРИСТАЯ ПОЛУПЛОСКОСТЬ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Нгуен Нгок Хоа, Тарлаковский Д.В.

*Московский государственный авиационный институт (национальный  
исследовательский университет), г. Москва, Россия*

Рассматривается задача о распространении нестационарных силовых граничных возмущений в полуплоскости  $z \geq 0$ , занятой упруго-пористой средой. Ее движение описывается линейными уравнениями модели Био [1,2] относительно скалярных потенциалов  $\varphi_1, \varphi_2$  и ненулевой компоненты  $\psi$  векторного потенциала перемещений в скелете и в жидкости:

$$\gamma_k^2 \ddot{\varphi}_k = \Delta \varphi \quad (k=1,2), \quad \gamma_3^2 \ddot{\psi} = \Delta \psi, \quad \dot{\gamma}_j = c_1/c_j, \quad (j=1,2,3)$$

где  $c_1$  и  $c_3$  - скорости распространения волн растяжения-сжатия и формоизменения в скелете;  $c_2$  - скорость распространения волн в жидкости; точками обозначено дифференцирование по времени  $\tau$ .

При этом перемещения  $u$  и  $U$  вдоль оси  $Ox$  в скелете и в жидкости связаны с потенциалами так:

$$u = \frac{\partial(\varphi_1 + \varphi_2)}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad w = \frac{\partial(\varphi_1 + \varphi_2)}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial x},$$

$$U = \frac{\partial(\beta_1 \varphi_1 + \beta_2 \varphi_2)}{\partial x} - \beta_3 \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad W = \frac{\partial(\beta_1 \varphi_1 + \beta_2 \varphi_2)}{\partial z} - \beta_3 \frac{\partial \psi}{\partial x},$$

где  $\beta_k$  ( $k=1,2,3$ ) - физические параметры, характеризующие пористость среды.

Компоненты тензора напряжений в скелете  $\sigma_{ij}$  и давление  $\sigma$  в порах связаны с перемещениями известными соотношениями [1,2].

На границе полуплоскости рассматриваются силовые условия, соответствующие поверхностным функциям влияния ( $\delta(x)$  – дельта-функция Дирака):

$$\sigma_{33}|_{z=0} = (1 - \beta_0) \delta(x) \delta(\tau), \quad \sigma|_{z=0} = \beta_0 \delta(x) \delta(\tau), \quad \sigma_{13}|_{z=0} = 0.$$

На бесконечности возмущения отсутствуют, а начальные условия нулевые:

$$\varphi_1|_{z=0} = \varphi_2|_{z=0} = \psi|_{z=0} = \dot{\varphi}_1|_{z=0} = \dot{\varphi}_2|_{z=0} = \dot{\psi}|_{z=0} = 0.$$

Для решения указанной начально-краевой задачи применяются преобразования Лапласа по времени и Фурье по координате  $x$  (параметр  $s$  и  $q$ , а также индексы « $F$ » и « $L$ » соответствуют изображениям этих преобразований):

$$\gamma_j^2 s^2 \varphi_j^{LF} = \frac{\partial^2 \varphi_j^{LF}}{\partial z^2} - q^2 \varphi_j^{LF} \quad (j=1,2), \quad \gamma_3^2 s^2 \psi^{LF} = \frac{\partial^2 \psi^{LF}}{\partial z^2} - q^2 \psi^{LF},$$

$$\sigma_{33}^{LF}|_{z=0} = 1 - \beta_0, \quad \sigma^{LF}|_{z=0} = \beta_0, \quad \sigma_{13}^{LF}|_{z=0} = 0.$$

Общие решения последних уравнений с учетом их ограниченности имеют вид ( $C_j(q, s)$  - постоянные интегрирования):

$$\varphi_l^{LF}(q, z, s) = C_l(q, s) e^{-k_l(q^2, s^2)z} \quad (l=1,2), \quad \psi^{LF}(q, z, s) = C_3(q, s) e^{-k_3(q^2, s^2)z},$$

$$k_j(q^2, s^2) = \sqrt{q^2 + \gamma_j^2 s^2} \quad (j=1,2,3), \quad \text{Re} \sqrt{\cdot} > 0.$$

С помощью этих равенств строятся изображения всех компонентов напряженно-деформированного состояния полуплоскости. Их оригиналы на границе полуплоскости находятся в явном виде с использованием таблиц обращения преобразований Лапласа

и Фурье, а также с помощью алгоритма совместного обращения этих преобразований, основанном на аналитическом представлении изображений [3].

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ.*

### **Литература**

1. Горшков А.Г., Тарлаковский Д.В. Нестационарная аэрогидроупругость тел сферической формы. – М.: Наука, 1990. – 264 с.
2. Наримов Ш.Н. Волновые процессы в насыщенных пористых средах. – Ташкент: «Мехмат», 1988. – 304 с.
3. Горшков А.Г., Медведский А.Л., Рабинский Л.Н., Тарлаковский Д.В. Волны в сплошных средах. – М.: Физматлит, 2004. – 472 с.

## **КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ И ВОЗМОЖНОСТЕЙ МОДИФИКАЦИИ ЭПОКСИДНЫХ КЛЕЕВ, НАПОЛНЕННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ**

Никитина Е.А.<sup>\*</sup>, Яновский Ю.Г.<sup>\*</sup>, Никитин С.М.<sup>\*,\*\*</sup>

*<sup>\*</sup>Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва, Россия*

*<sup>\*\*</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцина, МГУ, г. Москва, Россия*

В настоящей работе в качестве нового перспективного наполнителя для эпоксидных (ЭП) клеев рассматриваются углеродные нанотрубки (УНТ), кроме того, рассматривается возможность модификации компонентов таких клеев для придания особой прочности клеевым соединениям. Исследования механизмов взаимодействия компонентов таких клеев, а также компьютерный подбор модификации компонентов в настоящей работе проведен в рамках прямого квантово-механического моделирования с использованием оригинального пакета программ NDDO/*sp-sp<sub>d</sub>* (Оригинальный пакет квантово-механических программ NDDO/*sp-sp<sub>d</sub>*, ИПРИМ РАН, Свидетельство о государственной регистрации № 2009614949 от 10.09.2009).

При этом было получено, что частицы УНТ связываются с фрагментами эпоксидных цепей слабыми Ван-дер-Ваальсовыми силами, которые, однако в целом на фрагмент ЭП олигомера, несколько сильнее стандартных водородных связей (-7-9 ккал/моль), что может говорить об удерживании эпоксидных цепей на частицах УНТ. Взаимодействие фрагментов эпоксидных цепей с боковыми стенками и закрытыми концами УНТ несколько слабее, чем с открытыми концами УНТ, поэтому, по возможности, надо стремиться к открытию концов УНТ перед наполнением эпоксидных клеев. Кроме того, по возможности, необходимо использовать короткие УНТ, чтобы увеличить долю открытых концов на удельное содержание УНТ наполнителя в эпоксидном клее. Адсорбция фрагментов эпоксидных цепей на УНТ с большим диаметром энергетически более выгодна. Кроме того, многостенные (в нашем случае – двухстенные) УНТ адсорбируют эпоксидные цепи лучше.

Взаимодействие фрагментов немодифицированных эпоксидных цепей с открытыми концами УНТ, модифицированными карбоксильными группами, энергетически существенно выгоднее, чем взаимодействие с открытыми ничем не модифицированными концами УНТ. Поэтому для улучшения сцепления УНТ с эпоксидными цепями есть смысл модифицировать открытые концы УНТ карбоксилами.

Взаимодействие фрагментов модифицированных аминами эпоксидных цепей с открытыми немодифицированными концами УНТ энергетически более выгодно, чем взаимодействие немодифицированных фрагментов. Если рассматривать разные варианты использования модификаторов, то введение третичных групп на концах более предпочтительно. Кроме того, комбинирование бензольных и амидных групп в модифицированных концах эпоксидных цепей дает наиболее высокий эффект улучшения сцепления УНТ с эпоксидными смолами.

Взаимодействие фрагментов модифицированных третичными аминами эпоксидных цепей с модифицированными карбоксилами концами УНТ существенно более выгодно, чем взаимодействие немодифицированных фрагментов. Однако эффект использования двух модифицированных компонентов незначительно превосходит эффект использования только одного модифицированного компонента. Поэтому если на практике по экономическим или другим соображениям имеется возможность

использовать только одну модифицированную компоненту, можно ограничиться только этой мерой, или же модифицировать только эпоксидную компоненту.

## **ВАРИАНТ ПОДХОДА К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЛИНЕЙНОЙ УПРУГОЙ СРЕДЫ**

Шоркин В.С., Фроленкова Л.Ю., Якушина С.И.

*ФГБОУ ВПО "Государственный университет - УНПК", г. Орел, Россия*

В число положений, лежащих в основе моделирования линейной упругой среды, входит гипотеза о том, что состояние малой частицы полностью определяется тензором деформации, температурой (или энтропией) и параметрами, характеризующими механические и физические свойства среды. Для выделения определенной модели и получения замкнутой системы уравнений должна быть задана внутренняя (или свободная) энергия как функция характеристик термодинамического состояния: компонент тензора деформации и температуры (или энтропии). С учетом малости значений изменений этих величин при переходе из отсчетного состояния в текущее эта зависимость задается в виде суммы значения внутренней (или свободной) энергии в отсчетном состоянии и полинома второй степени с неопределенными коэффициентами от изменений значений характеристик термодинамического состояния. Неопределенные коэффициенты полинома предлагается определять экспериментально.

Предлагается:

- в зависимости от анализируемой проблемы рассматривать частицу как сферу, гантель или диполь, которые моделируют наличие атомной решетки, фононного и электронного (для металлов) газов;
- при определении характеристик термодинамического состояния малой частицы исходить из описания ее нелокального многочастичного взаимодействия с остальными частицами рассматриваемой ограниченной или неограниченной среды с последующим разложением в ряды Тейлора по внешним степеням радиус-векторов их относительных положений в отсчетном состоянии относительных смещений и поворотов;
- внутреннюю (или свободную) энергию в текущем состоянии задавать явной зависимостью от ее аргументов: температуры (или энтропии) и коэффициентов рядов Тейлора, а не суммой начального значения и полинома с неопределенными коэффициентами (в этом случае при использовании такого полинома коэффициенты вычисляются через производные, определенные в начальном состоянии).

Изложенный подход может позволить положить его в основу построения методов расчета упругих характеристик как классической, так и градиентной и микрополярной теорий упругости наноструктурированных сред, вычисления их поверхностной энергии, энергии и сил адгезии и когезии, теоретического и реального пределов прочности с учетом возникающей поврежденности.