

УДК 519.63

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ НИЗКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ ПО КОМПОЗИТНОЙ СТРИНГЕРНОЙ ПАНЕЛИ

© 2014 г. *И.Б. Петров, А.В. Васюков, К.А. Беклемышева, А.С. Ермаков,
А.С. Дзюба¹, В.И. Голован¹*

Московский физико-технический институт (Долгопрудный)

¹ Центральный аэрогидродинамический институт (Жуковский)

petrov@mipt.ru; vasyukov@gmail.com; amisto@yandex.ru; fufler@gmail.com

В работе представлены результаты численного моделирования последствий низкоскоростного удара по подкреплённой стрингерной панели, выполненной из композитного материала. Исследуется распространение упругих волн в композитном образце, их отражение от внешних границ образца и внутренних контактных границ между субпакетами композита. Области максимальных нагрузок и потенциальных разрушений в конструкции получены на основе анализа пространственно-временной волновой картины с использованием ряда критериев разрушения. Для решения системы уравнений используется сеточно-характеристический численный метод, учитывающий характеристические свойства определяющей системы уравнений в частных производных и позволяющий получить высокоточное решение динамической задачи.

Ключевые слова: сеточно-характеристический метод, механика деформируемого твердого тела, разрушение материала, полимерные композиты.

NUMERICAL MODELING OF LOW ENERGY STRIKE AT COMPOSITE STRINGER PANEL

I.B. Petrov, A.V. Vasyukov, K.A. Beklemysheva, A.S. Ermakov, A.S. Dziuba¹, V.I. Golovan¹

Moscow Institute of Physics and Technology

¹ Central Aerohydrodynamic Institute

The paper is devoted to numerical modeling of low energy strike at backed composite stringer panel. Elastic waves in composite medium are investigated, including interactions with both external borders of the sample and internal contact boundaries between composite subpackages. The areas of maximum stress and possible damage in the sample are determined from spatiotemporal dynamic load distribution and different destruction criterias. Grid-characteristic method is used for solving the system of equations with high space and time resolution.

Key words: grid-characteristic method, the mechanics of deformable solids, material destruction, polymer composites.

1. Введение

Композиционные материалы активно внедряются во многих областях техники. В том числе активно рассматривается возможность применения композиционных материалов в ответственных силовых конструкциях оперения, крыла и фюзеляжа самолёта. Данная работа связана с задачей изучения поведения материала при динамической нагрузке. Композиционные материалы после действия нагрузки могут заметно терять прочность даже при отсутствии видимых повреждений. Разрушение при этом может происходить как в объеме материала, так и на контактных границах между матрицей и наполнителем. В зависимости от типа нагрузки разрушение может носить деформационный или волновой характер.

Динамическое воздействие вызывает распространение упругих волн в образце. В силу сложного внутреннего строения композиционного материала итоговые области максимальных нагрузок в конструкции формируются в результате интерференции прямых волн, а также отражённых и преломлённых на внешних и внутренних контактных границах. В связи с этим для моделирования необходимо использовать численный метод, позволяющий получить полную волновую картину с высоким временным и пространственным разрешением с учётом влияния контактных границ [1, 2].

2. Постановка задачи

Геометрия конструкции. Рассматривается задача о динамическом нагружении элемента композитной обшивки крыла самолёта. На рис.1 приведена схема строения обшивки и силового кессона крыла.

Обшивка толщиной 6.5 мм состоит из 3 композитных субпакетов, стрингер толщиной 13 мм – из 6 аналогичных субпакетов. Каждый субпакет состоит из 11 монослоёв со взаимной ориентацией при укладке 45/0/-45/0/0/90/0/0/-45/0/45. Каждый монослой имеет следующий состав: 60% – ориентированные длинные углепластиковые волокна; 40% – матрица (эпоксидная смола).

Параметры воздействия. В эксперименте по непробивающему воздействию на обшивку нагрузка создается стальным ударником цилиндрической формы с диаметром закругления на конце 25.4 мм. В численном эксперименте задавалась начальная скорость ударника перед контактом с элементом обшивки, равная 6 м/с.

Рассматривается задача о динамическом нагружении элемента композитной обшивки крыла самолёта. На рис.1 приведена схема строения обшивки и силового кессона крыла.

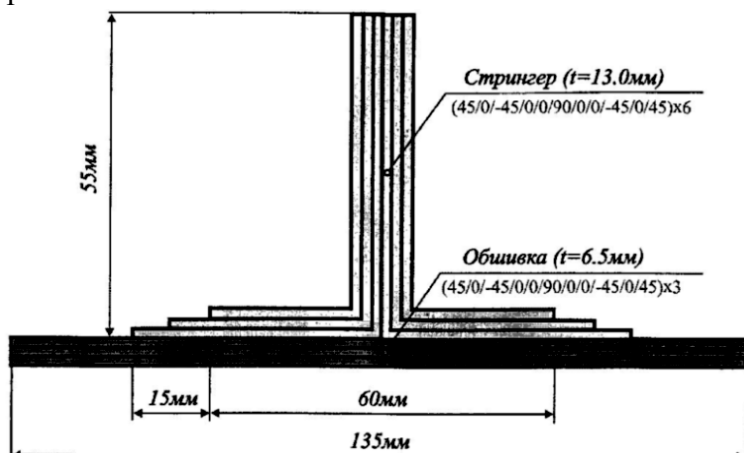


Рис.1. Обшивка и силовой кессон крыла.

Моделирование композитной конструкции. Свойства композитов определяются двумя факторами – свойствами исходных компонентов (матрицы и наполнителя) и структурой их упаковки в итоговый композиционный материал. Для определения эффективных характеристик композиционных материалов в настоящее время как правило применяются многомасштабные методы, разработанные под руководством Н.С. Бахвалова [3]. Многомасштабные методы позволяют осреднить упругие характеристики материала и заменить его эквивалентной однородной средой с эффективными характеристиками [4, 5].

В данной работе для моделирования разрушения композиционных материалов применяется сочетание использования осредненных характеристик и прямого численного моделирования без осреднения. Так, при моделировании обшивки самолета, состоящей из нескольких композитных субпакетов, каждый отдельный субпакет заменяется однородной средой с эффективными характеристиками, но при этом границы между отдельными субпакетами выделяются явно. Это позволяет учесть отражение и преломление упругих волн на контактных границах

Реология материалов преграды и ударника. Каждый отдельный субпакет в преграде рассматривается как однородный и изотропный, в основе описания которого лежит линейное уравнение связи напряжений и деформаций в виде закона Гука для изотропных тел. Конструкция состоит из композитных субпакетов, соединённых эпоксидной смолой. В данном приближении характеристики субпакетов принимаются равными характеристикам монослоёв, из которых они составлены. Анизотропия ниже структурного уровня субпакета, обусловленная укладкой монослоёв внутри субпакета, не рассматривается. Ударник считается деформируемым твёрдым телом, так же как и преграда, и моделируется явным образом. Характеристики всех материалов приведены в табл.1.

Таблица 1. Упругие характеристики слоёв и ударника.

Материал	E , ГПа	ν	ρ , кг/м ³	λ , ГПа	μ , ГПа	c_p , м/с	c_s , м/с
Монослой (субпакет)	8.5	0.32	1580	5.72	3.22	2775	1425
Эпоксидная смола	2.5	0.30	1250	1.44	0.96	1640	876
Сталь	200	0.28	7800	99.43	78.13	5725	3165

Начальные и граничные условия. В начальный момент времени напряжения в конструкции и ударнике отсутствуют, конструкция покоится, все точки ударника имеют одинаковую скорость v_0 , направленную по нормали к элементу обшивки. Все неконтактные границы конструкции и ударника считаются свободными, на них отсутствуют нормальные и касательные напряжения всюду, кроме точек, в которых осуществляется взаимодействие ударника с преградой.

Контактные границы. Контактные границы между слоями преграды считаются с условием полного сцепления. На контактирующих поверхностях задаётся равенство компонентов скорости.

Контакт между ударником и преградой полагается удовлетворяющим условию свободного скольжения. Нормальная по отношению к площадке соприкосновения ско-

рость движения приравняется к скорости движения ударника в проекции на то же направление. Вторым условием служит равенство нулю касательных к поверхности контакта напряжений. Вычисление состояния точек деформируемого ударника ведётся тем же методом, что и для преграды.

Критерии разрушения. В конструкции выделяются области потенциальных разрушений в соответствии с критерием наибольших нормальных напряжений, критерием наибольших сдвиговых напряжений, критерием Мизеса. Прочностные характеристики субпакетов приведены в табл.2. Разрушение ударника не рассматривается, так как при низкоскоростном ударе повреждения стального ударника не ожидается.

Таблица 2. Прочностные характеристики монослоёв.

Тип нагрузки	Предельно допустимая нагрузка, МПа
Растяжение вдоль волокон	2630
Сжатие вдоль волокон	1530
Растяжение поперёк волокон	86
Сжатие поперёк волокон	213
Сдвиг	112

3. Математическая модель

Для математического моделирования волновых процессов в деформируемом твёрдом теле используется система динамических уравнений (уравнения движения и реологические соотношения) [6, 7] в виде

$$\rho \dot{v}_i = \nabla_j \sigma_{ij} + f_i, \quad \sigma_{ij} = q_{ijkl} \dot{\varepsilon}_{kl} + F_{ij}. \tag{3.1}$$

Здесь ρ – плотность среды, v_i – компоненты скорости смещения, σ_{ij} , ε_{ij} – компоненты тензоров напряжений и деформаций, ∇_j – ковариантная производная по j -й координате, f_i – массовые силы, действующие на единицу объёма, F_{ij} – правая часть, используемая, например, для описания диссипации в моделях с учётом вязкости, вид компонент тензора 4-го порядка q_{ijkl} и правой части F_{ij} определяется реологией среды.

В случае малых деформаций тензор скоростей деформаций $e_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}$ выражается через компоненты скорости смещения линейным образом $e_{ij} = \frac{1}{2}(\nabla_j v_i + \nabla_i v_j)$.

Для замыкания системы уравнений (3.1) её необходимо дополнить уравнением состояния, определяющим зависимость плотности от напряжений $\rho = \rho_0 \exp \frac{p}{K}$, где $p = -\frac{1}{3} \sum \sigma_{kk}$ – давление, $K = \lambda + \frac{2}{3} \mu$ – коэффициент всестороннего сжатия, λ и μ – параметры Ламе. В простейшем случае линейной упругости:

$$q_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}), \quad F_{ij} = 0, \tag{3.2}$$

где δ_{ij} – символ Кронекера. Для упруго-пластического тела используется модель Прандт-

ля-Рейсса с условием текучести Мизеса. Тогда тензор q_{ijkl} и правая часть F_{ij} в (3.1) имеют более сложный вид [8]:

$$q_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) - \frac{I \mu \sigma_{ij} \sigma_{kl}}{K^2}, \quad F_{ij} = 0. \quad (3.3)$$

В этом соотношении K – предел текучести на сдвиг, I – параметр модели, который определяется следующим образом:

$$I = f(x) = \begin{cases} 0, & S = \sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 + 2\sigma_{xy}^2 + 2\sigma_{xz}^2 + 2\sigma_{yz}^2 < 2K^2, \\ 1, & S \geq 2K^2. \end{cases} \quad (3.4)$$

Очевидно, систему (3.1) можно переписать в матричной форме:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{A}_x \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} + \mathbf{A}_y \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial y} + \mathbf{A}_z \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} = \mathbf{f}. \quad (3.5)$$

Здесь $\mathbf{u} = \{v_x, v_y, v_z, \sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz}\}^T$ – вектор искомых функций, x, y, z – независимые пространственные переменные, t – время, \mathbf{f} – вектор правых частей, размерность которого равна размерности исходной системы, а выражения для компонентов зависят от реологии среды.

4. Метод численного решения

Для решения трёхмерной задачи (3.5) используется метод расщепления по направлениям. Идея метода решения исходной задачи состоит в замене исходной системы уравнений (3.5) одномерными системами:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{A}_x \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} &= \mathbf{0}, & \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{A}_y \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial y} &= \mathbf{0}, \\ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{A}_z \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} &= \mathbf{0}, & \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} &= \mathbf{f}. \end{aligned} \quad (4.1)$$

Спектральное исследование матриц $\mathbf{A}_x, \mathbf{A}_y, \mathbf{A}_z$ проведено в [10], где показано, что для них существует полный набор собственных значений и собственных векторов. В этом случае для любой из матриц $\mathbf{A}_x, \mathbf{A}_y, \mathbf{A}_z$ существует разложение:

$$\mathbf{A} = \mathbf{\Omega}^{-1} \mathbf{\Lambda} \mathbf{\Omega}, \quad (4.2)$$

где $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}\{\lambda_i\}$ – диагональная матрица соответствующих собственных значений, а $\mathbf{\Omega}$ – матрица, строки которой $\boldsymbol{\omega}_i^T$ являются собственными для матрицы \mathbf{A} и удовлетворяют соотношениям $\boldsymbol{\omega}_i^T \mathbf{A} = \lambda_i \boldsymbol{\omega}_i^T$. После перехода к инвариантам Римана $\mathbf{v} = \mathbf{\Lambda} \mathbf{u}$ уравнение приобретает вид

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{\Lambda} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} = \mathbf{0} \quad (4.3)$$

и тем самым распадается на n одномерных уравнений. Очевидно, значения инвариантов Римана переносятся с нижнего временного слоя t^n на верхний временной слой t^{n+1} вдоль характеристических кривых Γ таких, что $dx / dt = \lambda$.

Идея сеточно-характеристического метода на неструктурированных сетках изложена в [11]. В ходе расчёта для каждой характеристики, выпущенной из точки на верхнем временном слое, по углу наклона λ и шагу по времени τ определяется ячейка сетки на нижнем временном слое, в который попала характеристика Γ_i (рис.2). В данной работе используются сетки из тетраэдров (рис.3).

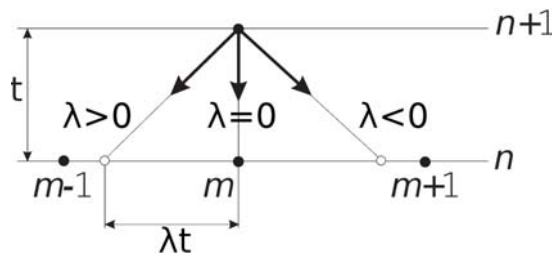


Рис.2. Принципиальная схема сеточно-характеристического метода.

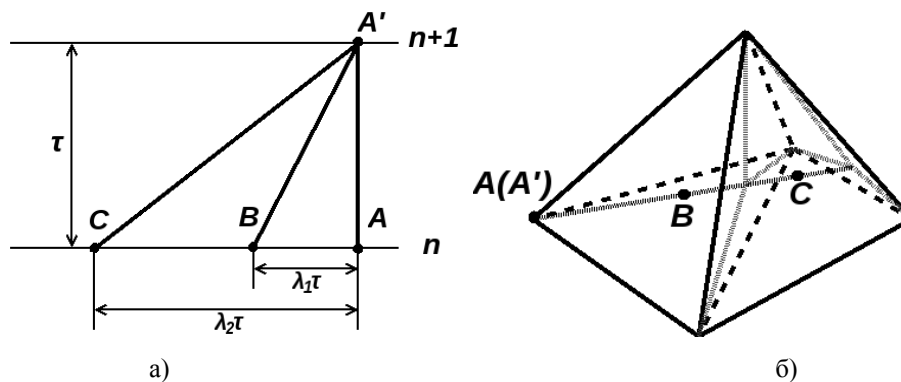


Рис.3. Характеристики на неструктурированной сетке. а) Расчет внутреннего узла. Все характеристики, выходящие из узла на новом временном слое, попадают внутрь области. Под точками на временных слоях n и $n+1$ подразумеваются точки в трехмерном пространстве. б) Расчет внутреннего узла. Положение необходимых точек в тетраэдрах при неподвижной сетке.

В точке пересечения характеристики Γ_i , выпущенной из верхнего слоя t^{n+1} , с координатной осью x_{i^*} тем или иным способом определяются значения переменных $\mathbf{u}_{i^*}^n$. Способы реконструкции могут быть различными, в данной работе используется интерполяция по сеточному шаблону на предыдущем временном слое. По найденным значениям $\mathbf{u}_{i^*}^n$ вычисляется i -й инвариант Римана $v_{i^*}^n$ в точке x_{i^*} .

Значение инварианта вдоль Γ_i будет перенесено в точку x_m на новом временном слое. После того как в точке x_m^{n+1} описанным образом найдены все 9 инвариантов Римана, можно найти в ней исходные переменные \mathbf{u} .

После того как определён тетраэдр, в который попала характеристика, необходимо восстановить значение в точке пересечения характеристики со старым временным слоем. Для этого используется интерполяция значений в нужной точке по рассматриваемо-

му тетраэдру. Подход к построению интерполяции высоких порядков на неструктурированных тетраэдральных сетках описан в работе Петрова И.Б. и Фаворской А.В. [12]. После того как определен тетраэдр ABCD, в который попала характеристика Γ_i , значение функции в искомой точке $\phi(\mathbf{r})$ необходимо выразить через значения $\phi_{abcd} = \phi(r_{abcd})$, которые она принимает в опорных точках (рис.4):

$$\phi(\mathbf{r}) = \sum_{a,b,c,d} w_{abcd}(\mathbf{r}) \phi_{abcd}, \tag{4.4}$$

где $w_{abcd}(\mathbf{r})$ – вес опорной точки \mathbf{r}_{abcd} .

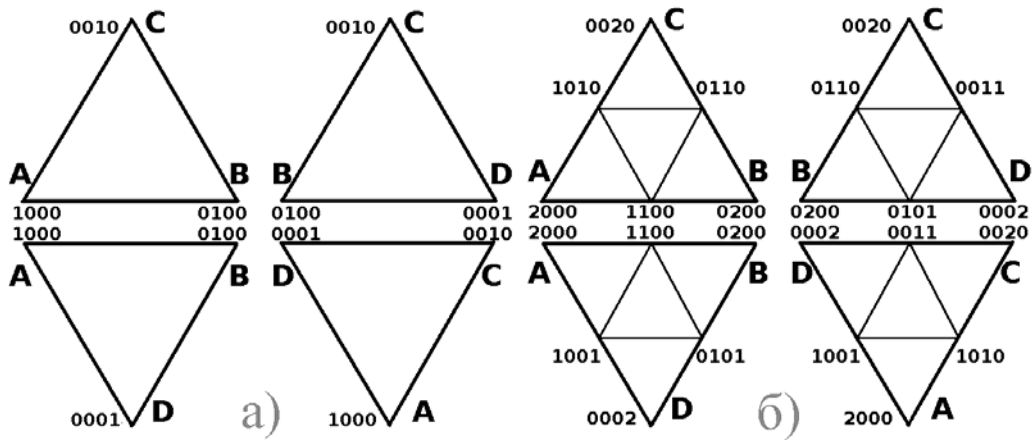


Рис.4. Опорные точки для интерполяции. а) Опорные точки для интерполяции первого порядка. б) Опорные точки для интерполяции второго порядка. Положение необходимых точек в тетраэдрах при неподвижной сетке.

Веса для интерполяции первого порядка имеют вид

$$\begin{aligned} w_{1000}(r) &= v_A(r), & w_{0100}(r) &= v_B(r), \\ w_{0010}(r) &= v_C(r), & w_{0001}(r) &= v_D(r). \end{aligned} \tag{4.5}$$

Веса для интерполяции второго порядка:

$$\begin{aligned} w_{2000}(r) &= v_A(r)(2v_A(r)-1), & w_{0200}(r) &= v_B(r)(2v_B(r)-1), \\ w_{0020}(r) &= v_C(r)(2v_C(r)-1), & w_{0002}(r) &= v_D(r)(2v_D(r)-1), \\ w_{1100}(r) &= 4v_A(r)v_B(r), & w_{0110}(r) &= 4v_B(r)v_C(r), \\ w_{0011}(r) &= 4v_C(r)v_D(r), & w_{1001}(r) &= 4v_D(r)v_A(r), \\ w_{1010}(r) &= 4v_A(r)v_C(r), & w_{0101}(r) &= 4v_B(r)v_D(r). \end{aligned} \tag{4.6}$$

Гибридная схема на неструктурированной сетке использует две опорные схемы: разобранные выше схемы с интерполяцией первого и второго порядка. В зависимости от

локальной гладкости численного решения происходит переключение между схемами: на гладких участках используется схема второго порядка, в области разрывов происходит переключение на схему первого порядка [13, 14].

Расчёт граничных узлов. В случае когда узел находится на границе расчётной области, рассматриваемая система уравнений имеет ровно три [10] выводящие характеристики. Поэтому для корректной постановки задачи требуется задание граничных условий для каждого граничного узла сетки в количестве, равном числу выводящих характеристик. В данной работе используется ряд граничных условий.

Свободная граница: $\sigma_\tau = \sigma_n = 0$. Здесь σ_n и σ_τ – нормальное и тангенциальное напряжения в граничной точке.

Заданная внешняя сила: $\sigma_\tau = \sigma_{\tau 0}$, $\sigma_n = \sigma_{n 0}$. Здесь $\sigma_{n 0}$ и $\sigma_{\tau 0}$ – заданные извне нормальное и тангенциальное напряжения в граничной точке.

Заданная скорость границы: $\mathbf{v} = \mathbf{v}_0$. Здесь \mathbf{v}_0 – заданный извне вектор скорости в точке границы.

Расчёт контактных узлов. Расчёт контактной границы между двумя телами в целом аналогичен расчёту границы тела. Однако в точке контакта присутствуют два узла – по одному из каждого контактирующего тела. Уравнения связей должны задавать 6 условий, чтобы компенсировать 3 несовместные уравнения в каждом узле. В результате получается система из 18 уравнений. Решая эту систему, получаем согласованные значения функции в обоих контактирующих узлах. В данной работе используется ряд контактных условий.

Скольжение тел друг относительно друга: $v_n = \tilde{v}_n$, $\sigma_n = \tilde{\sigma}_n$, $\sigma_\tau = \tilde{\sigma}_\tau = 0$. Здесь σ_n и σ_τ – нормальное и тангенциальное напряжения в граничной точке. Символы с чертой относятся к первому телу, без черты – ко второму.

Слипание тел: $v_n = \tilde{v}_n$, $v_\tau = \tilde{v}_\tau$.

5. Результаты моделирования

Были проведены расчеты для двух постановок эксперимента – удар по отдельному элементу обшивки и удар по элементу обшивки со стрингером. Вид расчетных областей приведен на рис.5. Часть расчётной сетки показана на рис.6.

На рис.7,8 показано распространение напряжений в зоне удара как для отдельного элемента обшивки, так и для конструкции со стрингером. В начальный момент (рис.8) фронт волны близок к сферическому, геометрические размеры определяются площадью контакта между ударником и пластиной, а точная форма – строением элемента обшивки.

На следующей стадии соударения (рис.7) в постановке без стрингера формируется волна растяжения, отражённая от свободной границы (рис.8а). Также заметно более слабая волна растяжения формируется в области, непосредственно прилегающей к зоне контакта. Для постановки со стрингером исходная волна сжатия еще не достигла свободной поверхности, от которой могло бы произойти заметное отражение. В результате наблюдаются менее выраженные области растяжения (рис.9б), обусловленные волной растяжения в зоне контакта и относительно слабыми волнами, отражёнными от границ между субпакетами.

На рис.9 показаны максимальные значения сжатия в каждой точке конструкции за все время соударения.

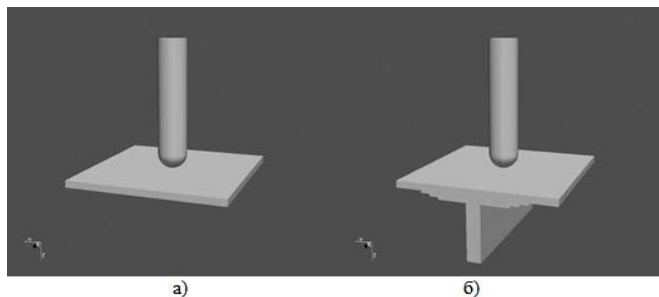


Рис.5. Расчётные области. а) Удар по элементу обшивки. б) Удар по элементу обшивки со стрингером.

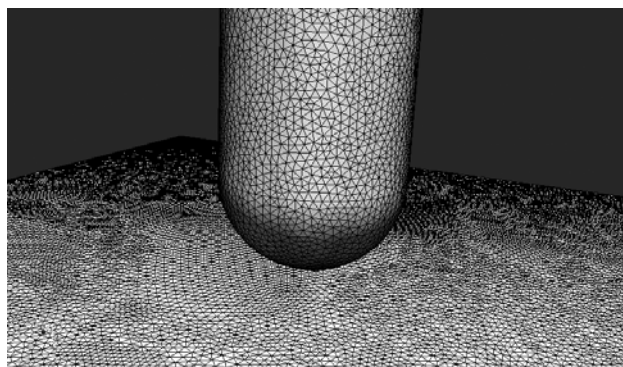


Рис.6. Расчётная сетка. Поверхностная сетка в элементе крыла и в ударнике в районе места удара.

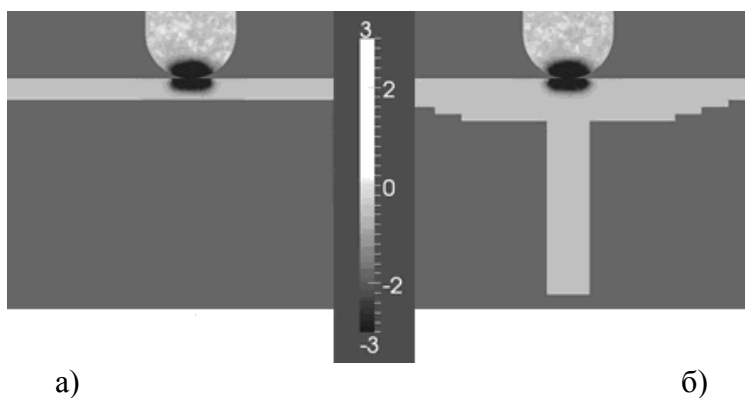


Рис.7. Начальный момент удара 0.5 мкс, отображены напряжения (100МПа). Черный соответствует сжатию. а) Удар по элементу обшивки. б) Удар по элементу обшивки со стрингером.

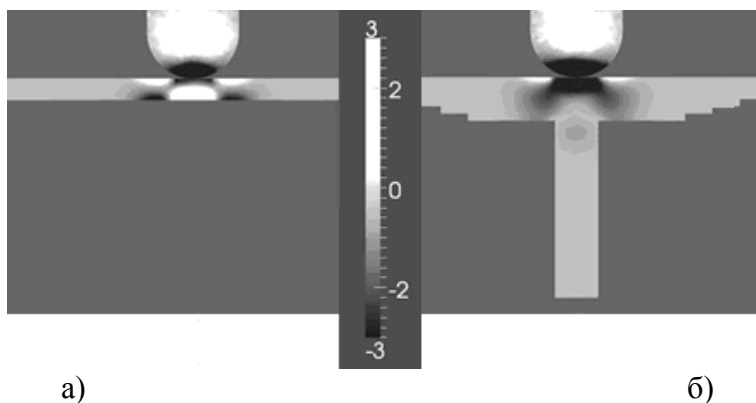


Рис.8. Проникновение волны в конструкцию, 8.0 мкс, отображены напряжения (100МПа). Черный соответствует сжатию. а) Удар по элементу обшивки. б) Удар по элементу обшивки со стрингером.

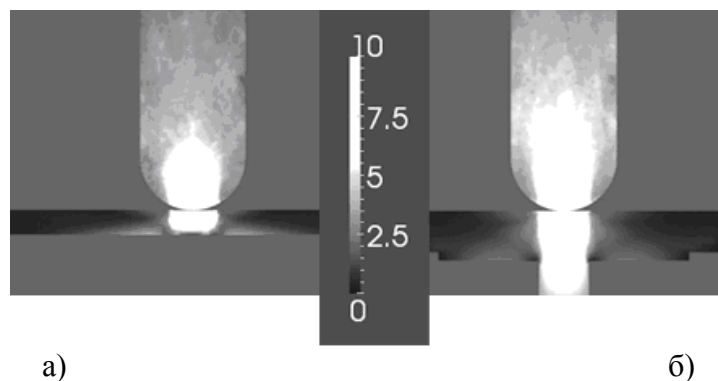


Рис.9. Максимальные сжатия (по модулю, 100 МПа) за всё время соударения.
а) Удар по элементу обшивки. б) Удар по элементу обшивки со стрингером.

В субпакетах элемента обшивки сжатие действует поперёк волокон, а в основании стрингера – вдоль волокон (см. рис.1). Так как прочность монослоёв на сжатие в направлении волокон почти на порядок больше, чем поперёк них, то основных разрушений в конструкции стоит ожидать в элементе обшивки.

На рис.10 показаны максимальные значения растяжения в каждой точке конструкции за все время соударения.

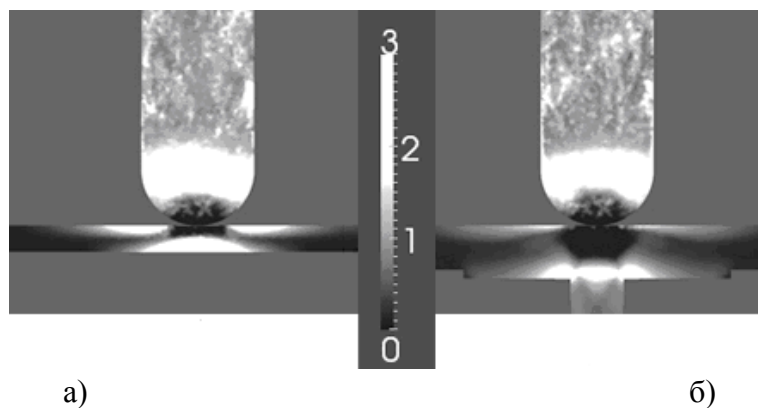


Рис.10. Максимальные растяжения (по модулю, 100 МПа) за всё время соударения.
а) Удар по элементу обшивки. б) Удар по элементу обшивки со стрингером.

В случае конструкции без стрингера растягивающие напряжения выражены достаточно явно. Это связано с многократным переотражением волн в тонкой конструкции. Волны растяжения от первого и второго отражения имеют значительную амплитуду и действуют поперёк направления волокон, именно к такому типу нагрузки монослой наименее устойчивы. Диаметр зоны потенциальных разрушений оказывается заметно больше размеров ударника и составляет около 50 мм. В случае конструкции со стрингером столь ярко выраженные зоны растягивающих напряжений не формируются, так как волна нагрузки большей частью проходит в стрингер, который таким образом разгружает обшивку.

На рис.11 показаны максимальные значения сдвиговых напряжений в каждой точке конструкции за все время соударения. На качественном уровне картина оказывается одинаковой как для одиночного элемента обшивки, так и для элемента обшивки со стрингером. Количественно размер повреждённой зоны оказывается несколько больше во втором случае из-за большей толщины конструкции в месте удара. Во всей области

действия максимальных сдвиговых нагрузок структура композита такова, что направление сдвига приходится поперёк волокон.

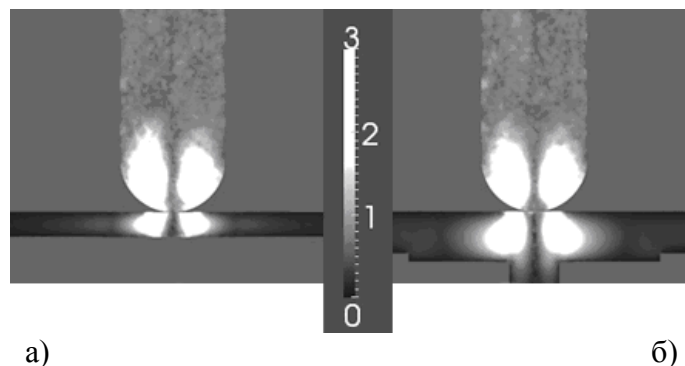


Рис.11. Максимальные сдвиговые напряжения (по модулю, 100 МПа) за всё время соударения. а) Удар по элементу обшивки. б) Удар по элементу обшивки со стрингером.

На рис.12 показаны максимальные значения эквивалентного напряжения Мизеса в каждой точке конструкции за все время соударения. В постановке без стрингера напряжения Мизеса значительно меньше, чем при наличии стрингера, так как отражения от близкой свободной поверхности быстро компенсируют девиаторную часть нагрузки, переводя её в растяжения.

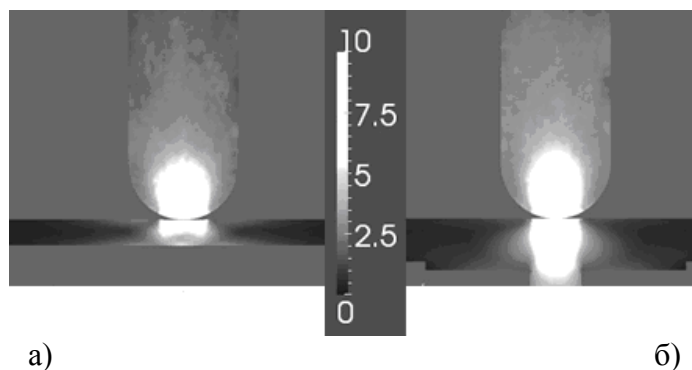


Рис.12. Максимальное эквивалентное напряжение Мизеса (по модулю, 100 МПа) за всё время соударения. а) Удар по элементу обшивки. б) Удар по элементу обшивки со стрингером.

Для оценки итоговых областей разрушений необходимо учитывать разрушения всех приведённых типов. Интегральная оценка областей потенциального разрушения материала для постановки с отдельным элементом обшивки приведена на рис.13. Размер разрушенной области заметно превышает размер ударника и составляет 50-60 мм. По форме разрушенная область представляет собой немного деформированный цилиндр.

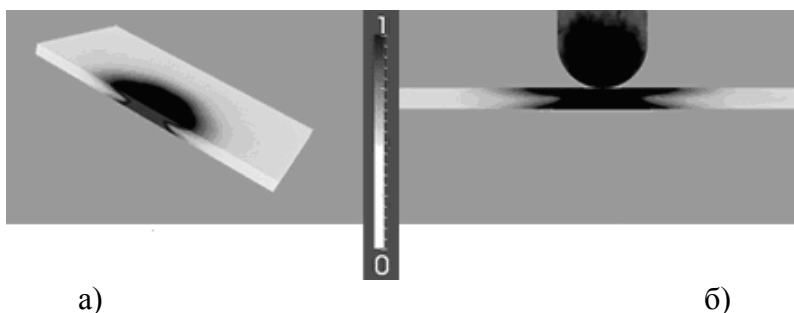


Рис.13. Области разрушений в элементе обшивки. Черным цветом показана разрушенная область. а) Срез через центр элемента параллельно грани. б) Сечение через центр элемента.

Интегральная оценка областей потенциального разрушения материала для постановки с элементом обшивки и стрингером приведена на рис.14. Размер разрушенной области порядка размера ударника – 25 мм. По форме разрушенная область представляет собой колокол, уходящий вглубь конструкции. Отдельный комментарий необходим относительно отмеченной области разрушения в стрингере. Значения напряжений в данной области действительно достаточно велики, однако воздействие направлено вдоль волокон. Нагрузки в направлении волокон монослой выдерживает практически на порядок лучше, чем поперёк волокон, поэтому на практике разрушения в стрингере маловероятны.

Также были выполнены расчёты для несимметричного удара по элементу обшивки со стрингером. Вид расчётной области представлен на рис.15. Точка удара в этой постановке смещена от оси прикрепления стрингера на 30 мм перпендикулярно плоскости стрингера. Все остальные параметры объектов без изменений.

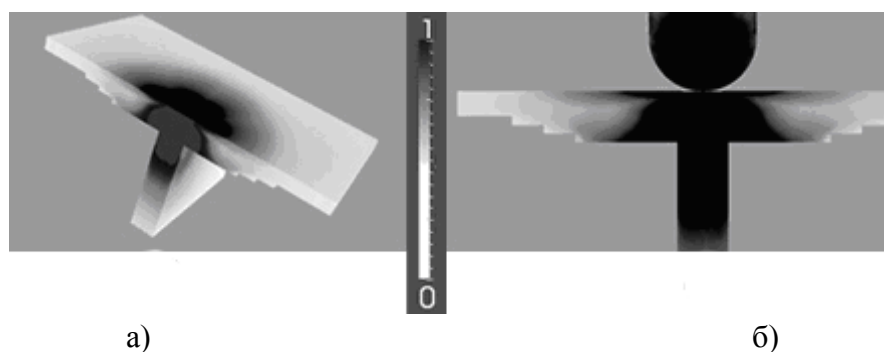


Рис.14. Области разрушений в элементе обшивки со стрингером. Черным цветом показана разрушенная область. а) Срез через центр элемента параллельно грани. б) Сечение через центр элемента.

Полученные значения максимальных напряжений представлены на рис.16. Распределение максимальных сжатий, сдвигов и напряжений Мизеса хорошо совпадает с аналогичными распределениями для удара по элементу обшивки без стрингера.

Иначе обстоит дело для волн растяжения – их распределение принципиально отличается от рассмотренных постановок с центральными ударами. В рассматриваемой постановке зона контакта ударника и пластины находится напротив края крепления стрингера. Первоначальная волна сжатия отражается как от тыльных поверхностей субпакетов (параллельных внешней поверхности обшивки), так и от кромок субпакетов стрингера (расположенных перпендикулярно к поверхности обшивки). В результате каждого такого отражения формируется волна растяжения. Три такие волны движутся вверх и три – вправо. При сложении этих волн формируется итоговая область растягивающих напряжений (рис.16б). Амплитуда растягивающих напряжений в области края крепления стрингера из-за сложения волн оказывается в 2.5 раза больше, чем значение на тыльной поверхности для конструкции без стрингера. При этом на верхней границе образца растягивающие напряжения оказываются заметно меньше (в 1.5-2 раза) по сравнению с элементом обшивки без стрингера.

Интегральная оценка воздействия и потенциальные зоны разрушения при нецентральной ударе показаны на рис.17. Форма области близка к колоколу, но при этом является достаточно узкой – её диаметр не превышает диаметра ударника и составляет 20-25мм.

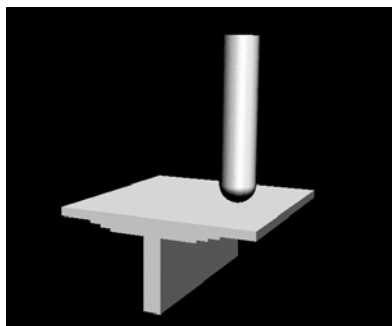


Рис.15. Несимметричный удар по элементу обшивки со стрингером. Вид расчетной области.

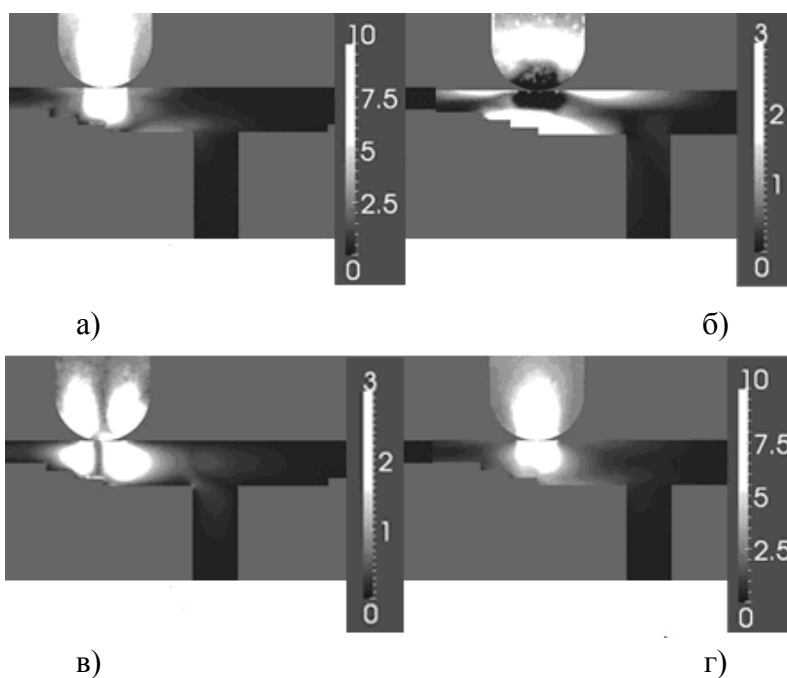


Рис.16. Максимальные нагрузки при нецентральной ударе. а) Максимальное сжатие (по модулю, 100 МПа) за всё время соударения. б) Максимальное растяжение (по модулю, 100 МПа) за всё время соударения. в) Максимальное сдвиговое напряжение (по модулю, 100 МПа) за всё время соударения. г) Максимальное напряжение Мизеса (по модулю, 100 МПа) за всё время соударения.

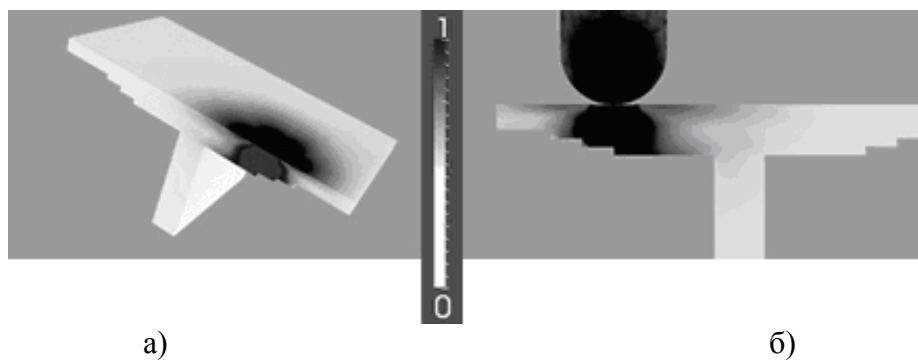


Рис.17. Области разрушений при нецентральной ударе. Черным цветом показана разрушенная область. а) Срез через центр элемента параллельно грани. б) Сечение через центр элемента.

Ударные повреждения наносились на копре с вертикально падающим грузом Dynatur 9250HV фирмы INSTRON (рис.18). Удар наносился бойком с полусферическим

наконечником диаметром 25.4 мм. На рис.19 показаны зоны расслоения при ударе в обшивку и при ударе по оси стрингера.

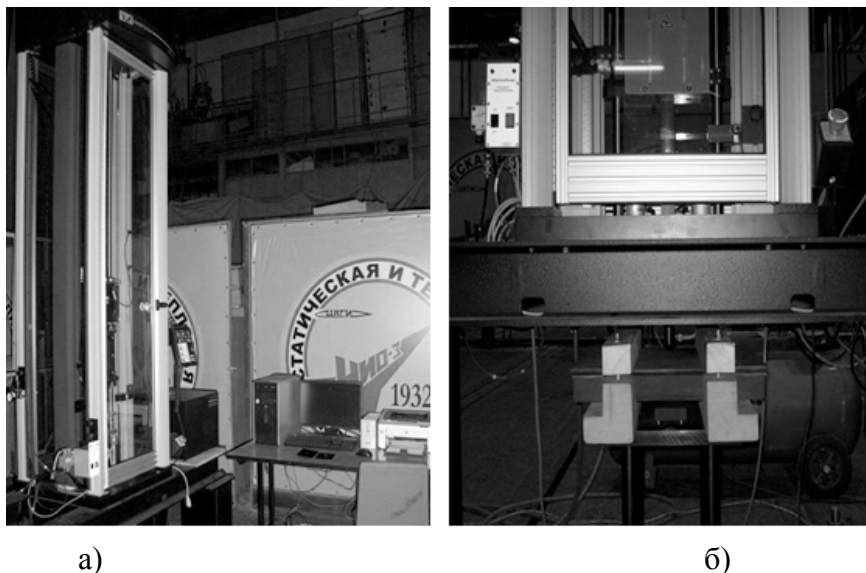


Рис.18. Экспериментальная установка. а) Общий вид установки. б) Рамка с образцом.

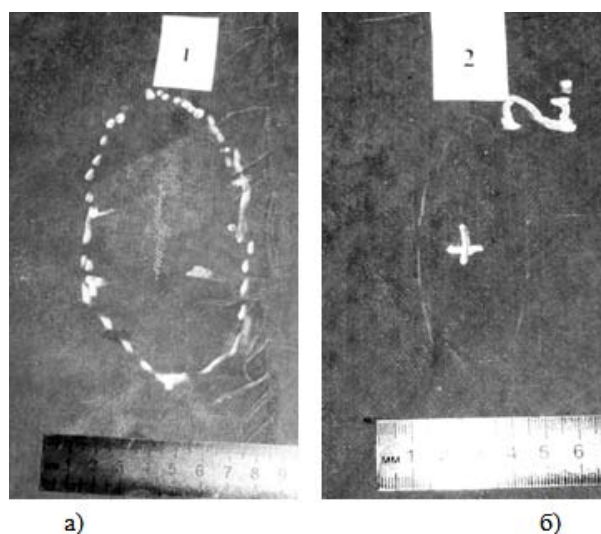


Рис.19. Результаты эксперимента. а) Удар в обшивку. б) Удар в обшивку.

Таблица 3. Области концентрации напряжений.

Постановка задачи	Диаметр разрушенной области (расчет), мм	Диаметр разрушенной области (эксперимент), мм	Чем обусловлено разрушение
Элемент обшивки без стрингера, центральный удар	50-60	65	Сжатие и сдвиг в центральной зоне, растяжение в периферийной зоне
Элемент обшивки со стрингером, центральный удар	25-30	30	Сжатие, сдвиг, напряжение Мизеса
Элемент обшивки со стрингером, нецентральный удар	20-25	эксперимент не проводился	Сжатие и сдвиг на внешней поверхности, растяжение на тыльной поверхности

Основные результаты по определению области разрушения конструкции представлены в табл.3. Формы областей концентрации напряжений приведены на рис.13, 14 и 15 соответственно. Получено, что наличие стрингера существенно разгружает элемент обшивки при динамическом воздействии и уменьшает размер потенциально поврежденных областей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Петров И.Б., Холодов А.С.* Численное исследование некоторых динамических задач механики деформируемого твердого тела сеточно-характеристическим методом // Журн. выч. мат. и мат. физ., 1984, т.24, № 5, с.722-739.
2. *Петров И.Б., Тормасов А.Г., Холодов А.С.* О численном изучении нестационарных процессов в деформируемых средах многослойной структуры // Механика твердого тела, 1989, №4, с.89-95.
3. *Бахвалов Н.С., Панасенко Г.П.* Осреднение процессов в периодических средах // Математические задачи механики композиционных материалов. 1984
4. *Димитриенко Ю.И., Соколов А.П.* Современный численный анализ механических свойств композиционных материалов // Известия РАН. Физическая серия, 2011, т.75, №11, с.1551-1556.
5. *Димитриенко Ю.И., Соколов А.П.* Многомасштабное моделирование упругих композиционных материалов // Математическое моделирование, 2012, т.24, №5, с.3-20.
6. *Новацкий В.* Теория упругости. – М.: Мир, 1975, 872 с.
7. *Седов Л.И.* Механика сплошной среды. Том 1. – М.: Наука, 1970, с.143.
8. *Иванов В.Д., Кондауров В.И., Петров И.Б., Холодов А.С.* Расчет динамического деформирования и разрушения упругопластических тел сеточно-характеристическими методами // Матем. моделирование, 1990, т.2, №11, с.10-29.
9. *Федоренко Р.П.* Введение в вычислительную физику. – М.: Изд-во Моск. физ.техн. ин-та, 1994, 528 с.
10. *Челноков Ф.Б.* Численное моделирование деформационных процессов в средах со сложной структурой / Дисс. канд. физ.-мат. наук. – М.: 2005.
11. *Магомедов К.М., Холодов А.С.* Сеточно-характеристические численные методы. – М.: Наука, 1988, 288 с.
12. *Петров И.Б., Фаворская А.В.* Библиотека по интерполяции высоких порядков на неструктурированных треугольных и тетраэдральных сетках // Информ. технологии, 2011, №9, с.30-32.
13. *Васюков А.В., Петров И.Б., Черников Д.В.* О сеточно-характеристическом численном методе на неструктурированных сетках для задач механики деформируемого твердого тела в случае трех пространственных переменных // Сборник научных трудов «Информационные технологии: модели и методы». – М.: МФТИ, 2010, с.52-57.
14. *Васюков А.В., Петров И.Б.* О разработке параллельной версии сеточно-характеристического метода для трехмерных уравнений механики деформируемого твердого тела // Сборник научных трудов «Модели и методы обработки информации». – М.: МФТИ, 2009, с.13-17.

Поступила в редакцию 13.09.2013.