

ISSN 2016-7250

**MEХАНИКА  
MUAMMOLARI**

**ПРОБЛЕМЫ  
МЕХАНИКИ**

$\frac{4}{2017}$

*K. Atabaev, T. Djalilova, A.R. Djaborov. Research in energy balance components with a flat barrier*

*Within the limits of model of the nonlinear-compressed plastic environment the decision in the flat semilimited barrier (target) from AMz-6 is represented at high-speed blow in experiment. Results of calculations of components of energy balance, pressure and depth of a crater in spherical wave, on a cavity and in area between front of a wave and crater border are resulted diameter of particles. The settlement sizes of a crater in a target are compared with experimental*

УДК 539.3

Р.А. АБДИКАРИМОВ

### ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВЯЗКОУПРУГИХ ТОНКОСТЕННЫХ ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ С УЧЕТОМ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Рассматривается тонкостенная пологая оболочка прямоугольного поперечного сечения. Координатную поверхность принимается некоторая внутренняя поверхность. Оси  $Ox$  и  $Oy$  направляются по линиям главных кривизн координатной поверхности, а ось  $Oz$  — по нормали к координатной поверхности в сторону вогнутости (вниз). Толщина оболочки  $w$  и задается ограничивающими ее в вертикальном направлении поверхностями  $w = w(x, y, z)$  и  $w = w(x, y, z) + w_0$ .

Математическая модель задачи о нелинейном колебании вязкоупругой оболочки переменной толщины получена в геометрически нелинейной постановке по методу Кирхгофа–Лява.

Деформации  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}$  связаны с составляющими перемещениями  $u, v, w$  соотношениями

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} - k_x w + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} - k_y w + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2; \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} - k_{xy} w + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y}$$

Физические уравнения связи напряжений с деформациями имеют следующий вид

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} (1-\Gamma^*) (\varepsilon_x + \mu \varepsilon_y), \quad \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2} (1-\Gamma^*) (\varepsilon_y + \mu \varepsilon_x), \quad \sigma_{xy} = \frac{E}{2(1+\mu)} \gamma_{xy}$$

где  $E$  — модуль упругости;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $\Gamma^*$  — интегральная функция релаксации  $\Gamma(t)$ :  $\Gamma^* \varepsilon = \int_0^t \Gamma(t-\tau) \varepsilon(\tau) d\tau$ ;  $t$  — время наблюдения;  $\tau$  — предшествующее время.

Соотношения для усилий  $(N_x, N_y, N_{xy})$  и моментов  $(M_x, M_y, H)$ , взятых по длине сечения оболочки, имеют вид:

$$N_x = \int_{z_b}^{z_H} \sigma_x dz; \quad N_y = \int_{z_b}^{z_H} \sigma_y dz; \quad N_{xy} = \int_{z_b}^{z_H} \sigma_{xy} dz$$

Расчетные и экспериментальные результаты, полученные на установ

$T, ^\circ\text{C}$	№, эксп.	$V_0, \text{м/с}$	$d_0, \text{мм}$	$d_{кр}, \text{мм}$		эксп
				эксперимент	расчет	
20	1300	5310	10.72	41.0	28.614	
20	1299	6980	8.33	35.0	26.436	
20	1298	6600	8.33	32.5	25.54	
20	1297	6580	8.33	32.0	25.492	
20	1256	5990	10.72	42.5	30.938	
20	1285	6400	9.53	37.0	28.672	

Как видно, разница результатов расчета и эксперимента по глубине кратера составляет приблизительно 15 и 30% и завышенные значения  $h_{кр}^{эк}$  и  $R_{кр}^{расчет}$  обусловлены наличием в эксперименте выброса масс из кратера.

Таким образом, в целом можно заключить, что в работе разработана методика расчета параметров кратерообразования в плоской мишени с учетом тепловых («холодных») составляющих энергии и уравнения состояния материала мишени при разных скоростях удара и диаметра частицы.

Численно определены глубина и радиус кратера, ударно-волновые параметры внутренней энергии, давления и температура мишени в области между ударной волной.

Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными.

С использованием энергетического критерия установлено, что при ударе по мишени находится в жидко-плавленном состоянии, а зона парообразования.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 09-08-00589-а).

#### Литература

- [1] Ведер Дж.Ф., Мандевиль Ж.К. Микроратеры, образованные в стекле ударами // Механика. №12. Механика образования воронок при ударе и взрыве. М.: Мир, 1990.
- [2] Динс Дж., Уолш Дж. Теория удара: Некоторые общие принципы и метод расчета // Высокоскоростные ударные явления. М.: Мир, 1973. С. 48–111.
- [3] Малама Ю.Г. Численное моделирование высокоскоростного удара по полубесконечной мишени // Механика. №12. Механика образования воронок при ударе и взрыве. М.: Мир, 1990.
- [4] Рахматулин Х.А., Сагомоян А.Я., Алексеев Н.А. Вопросы динамики ударов // МГУ, 1964. –239 с.
- [5] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Изд. 4-е. М.: Наука, 1988. Т.6. – 304 с.
- [6] Уолш Дж., Шрефлер Р.И., Уиллич Ф. Предельные условия для образования воронок на высоких скоростях // Сб. пер. и обзоров иностранной литературы. «Механика». Вып. 1. М.: Мир, 1973. С. 1–11.
- [7] Сапожников А.Т., Миронова Е.Е., Шахова Л.Н. Уравнение состояния вещества при плавлении, испарении и ионизации. VIII Забавихинские научные чтения. Челябинск, 2000.
- [8] Аверсьев С.П., Мамадалиев Н. Применение модели пластического гашения следования процесса кратерообразования в плоской мишени при высокоскоростном ударе // Космонавтика и ракетостроение. Вып.1 (54). 2009. С.134–144.
- [9] Физика быстротекущих процессов. М.: Мир, 1971. – 352 с.

Анализ представленных на рис.1 результатов расчетов показывает, что в пара подобия  $h_{кр}/d_{сф}$ , т.е. отношения глубины кратера  $h_{кр}$  к диаметру частицы  $d_{сф}$ , скорости удара частицы  $V_0$  находятся в удовлетворительном соответствии с данными, полученными на установке МБУ. Их разница при  $V_0 = 5.314-7.050$  км/с по составу составляет порядка 15%. Отсюда следует, что результаты расчета и измерений пара взаимно согласованы (в пределах ~15%) и предложенная методика расчета в принципе адекватно описывает ударно-волновой процесс в мишени при соударении с частицы.

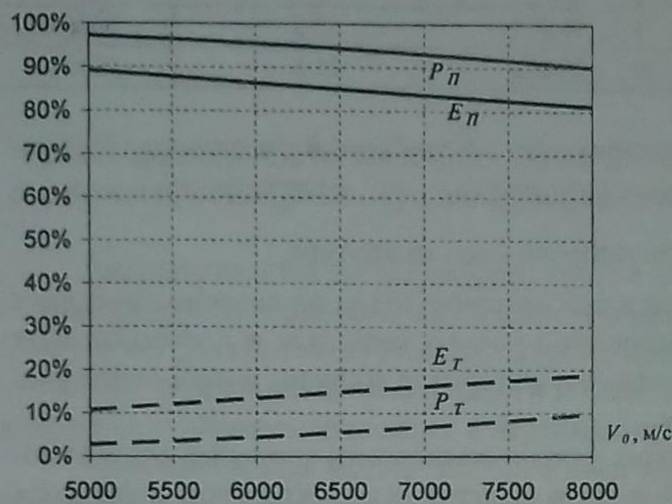


Рис.3. Доля «холодной» (сплошная линия) и тепловой (пунктирная линия) составляющих давления  $P$  и внутренней энергии  $E$  в зависимости от скорости удара  $V_0$  в начальный момент времени

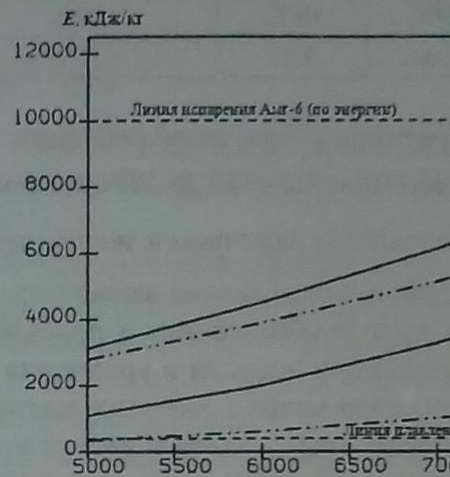


Рис.4. Величины температуры  $T$ , внутренней энергии  $E$  (сплошная линия), а также «холодной» составляющей внутренней энергии  $E_T$  (пунктирная линия) в зависимости от скорости удара  $V_0$  в начальный момент времени

Причем в диапазоне изменения скорости частицы  $V_0 = 5-8$  км/с вышеуказанный параметр кратера  $h_{кр}/d_{сф}$  в зависимости от  $V_0$  изменяется почти линейно.

Дальнейшее изучение составляющих баланса внутренней энергии в мишени от времени  $t$  (рис.2) позволяет заметить, что величины «холодной» составляющей на фронте сферической волны намного больше, чем на кратере, а тепловая ее составляющая имеет наибольшее значение на поверхности кратера. Следовательно, материал мишени в области фронта волны мгновенно нагружается в соответствии с диаграммой сжатия (3). За фронтом области происходит необратимый процесс разгрузки ее материала, и ратурная область примыкает к поверхности кратера.

Кроме того, величины составляющих энергии  $E_{П}$  и  $E_{Т}$  как на фронте волны в зависимости от времени  $t$  монотонно убывают. Но процесс затухания величин происходит быстрее на поверхности кратера, чем на волне, а для  $E_{Т}$  этот процесс наоборот, т.е. величины  $E_{Т}$  в зависимости от  $t$  затухают быстрее на фронте волны. Это дает основание полагать, что при сверхвысоких скоростях частицы вблизи зоны испарения конечной толщины в материале мишени и ее в дальнейшем при термическом образовании необходимо учитывать.

где  $\varepsilon = (1 - \rho_0/\rho)$  – деформация среды;  $u, \dot{u} = du/dt$  – перемещение и текущие плотности, давления и внутренней энергии единицы массы среды  $E_n, E_T$  – потенциальные (ударно-волновые) и тепловые составляющие энергии (параметры мишени, относящиеся к фронту волны, обозначены  $P, P_T$ ).

Потенциальное (холодное) давление  $P_n(\varepsilon)$  во фронте интенсивных уровней давления порядка  $10^5 \text{ МПа}$  на основе экспериментальных результатов представляется в виде

$$P_n(\varepsilon) = P_n^*(\varepsilon^*) = \frac{\alpha_1 \cdot \varepsilon^* + \alpha_2 \cdot \varepsilon^{*2} + \alpha_3 \cdot \varepsilon^{*3} + \alpha_4 \cdot \varepsilon^{*4}}{1 + 1.5\varepsilon}$$

где  $\alpha_1 = 7.33 \cdot 10^5, \alpha_2 = 1.13 \cdot 10^6, \alpha_3 = 0, \alpha_4 = 2.38 \cdot 10^6 \text{ (кг/см}^2\text{)}, \rho_0 = 264 \text{ кг}\cdot\text{с}^2/\text{м}^4$ .

Согласно модели «пластического газа» [4], материал мишени в момент  $t = R(t)$  мгновенно нагружается по ударной адиабате (3), а за фронтом деформации происходит жесткая необратимая разгрузка материала по разгрузочной адиабате  $P = P_T(\varepsilon)$ , которая представляется вертикальной к оси  $\varepsilon$  линией. В этом случае среда в области между фронтом волны и границей кратера имеет вид

$$\varepsilon = 1 - \frac{P_0}{\rho} = \varepsilon^*(r),$$

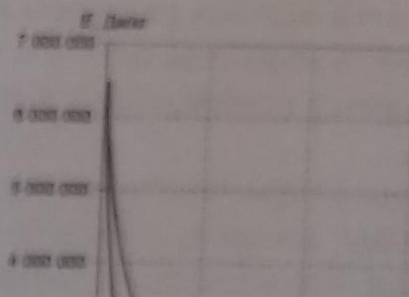
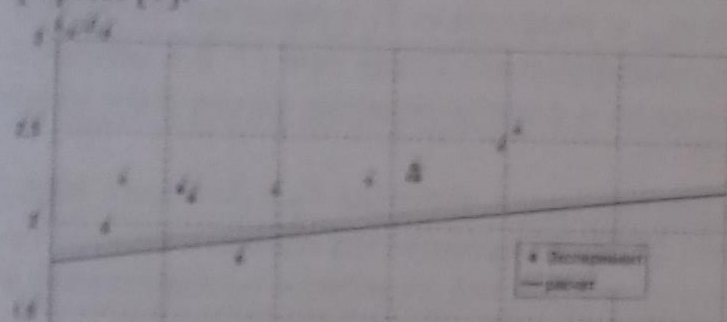
где  $\varepsilon^*(r)$  – неизвестная функция, определяемая в ходе решения задачи.

Отметим, что при выполнении (4) потенциальное давление  $P_n(\varepsilon)$  в деформированной области среды определяется путем интегрирования системы уравнений, составляющая внутренней энергии среды вычисляется по формуле [5]

$$E_n(\varepsilon) = \int_{\rho_0}^{\rho} \frac{P_n(\varepsilon)}{\rho^2} d\rho + E_0,$$

где  $E_0$  – произвольная аддитивная константа.

Для тепловых составляющих давления  $P_T(\varepsilon, T)$  и внутренней энергии  $E_T$  мишени используются нелинейные экспериментальные зависимости от температуры  $T$  формы [7].



К. АТАБАЕВ, Т. ДЖАЛИЛОВА, А.Р. ДЖАББОРОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ БАЛАНСА ЭНЕРГИИ  
ВЫСОКОСКОРОСТНОМ СОУДАРЕНИИ СФЕРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ  
ПРЕГРАДОЙ

Одной из основных задач в проблеме обеспечения защищенности орбитальных систем от воздействия осколков космического мусора является защита. Экспериментальная отработка многослойных защитных экранов на бипластинчатых углановках. Однако они в настоящее время обеспечивают защиту мишени  $\sim (7-7.4)$  км/с, которая захватывает лишь нижний предел этому в последнее десятилетие возникла необходимость для развития моделирования процесса кратерообразования, позволяющих адекватно моделировать процесс соударения тел и дать прогнозирующие оценки его параметров скорости соударения.

В работе задача о кратерообразовании в плоской преграде сферической мишени. Для этого в качестве первого приближения допущены параметры мишени, в том числе величина давления, определяемая из расхождений тел при  $t=0$ , симметрично расположенны по границе сферического мишени ее близких границ на ударно-волновой процесс можно пренебречь кратерообразовании в полуограниченной мишени сводится к исследованию расширения пластины в нелинейно-сжимаемой среде под действием интенсивного

Начальные значения давления, т.е. нагрузки на мишень, и другие параметры двух тел на их контактной поверхности в момент  $t=0$  определяются следующим образом:

$$P_{\text{удар}} = \frac{\rho_0 V_0^2}{4\varepsilon_{\text{удар}}}; \quad \dot{u}_{\text{удар}} = \frac{V_0}{2}; \quad \dot{R}_{\text{удар}} = \frac{\dot{u}_{\text{удар}}}{\varepsilon_{\text{удар}}}; \quad \Delta E_{\text{удар}} = E - E_0 = \frac{V_0^2}{8}; \quad \varepsilon_{\text{удар}} = 1 -$$

где  $P_{\text{удар}}$ ,  $\dot{u}_{\text{удар}}$ ,  $\rho_{\text{удар}}$ ,  $\varepsilon_{\text{удар}}$  - соответственно давление, массовая скорость, плотность за фронтом ударной волны;  $\dot{R}_{\text{удар}}$  - скорость пластической волны;  $\Delta E_{\text{удар}}$  - разность энергии единицы массы в момент  $t=0$ ;  $V_0$  - скорость удара сферической

Пусть в момент  $t=0$  частица радиусом  $r_0$ , массой  $m_{\text{сф}}$  и скоростью  $V_0$  ударяет по плоской преграде из АМг-6, представляемой в виде полупространства. Тогда на мишени образуется кратер определенной формы и размеров в сопровождении ударно-волновых процессов.

Материал мишени в окрестности кратера при скоростях удара считается в жидком состоянии, которое, в отличие от работы [2,3], моделируется [4]. Предполагается, что материалы частицы и полупространства являются изотропными.

## МУНДАРИЖА

- К. Атабаев, Т. Джалилова, А. Р. Джабборов. Сферик заррани ясси тўсик билан тўқнашувида энергия балансини ташкил этувчиларни ўрганиш .....
- Р.А. Абдикаримов. Катта деформацияларни ҳисобга олган ҳолда ўзгарувчан калинликдаги кўпқабатли конструкцияларнинг динамик ҳисоби .....
- Т.Р. Рашидов, Д.А. Бекмирзаев. Ихтиёрий йўналган сейсмик юкланишлардаги ортогонал ер ости қувурлари сейсmodинамикаси.....
- М.К. Усаров. Бимоментларни ҳисобга олган ҳолда тўртбурчак ортороп пластинкани динамик ҳисоблаш.....
- А. Бегматов. Юмшоқ грунтларда бўйлама тўлқинларнинг тарқалиши .....
- Н.М. Икромов, Т.Ш. Мажидов. Ҳар хил таркибдаги туб лойка чуқиндиларини ўзган жўякларининг баландлигига таъсири .....
- К.Н. Наврузов, С.Х. Ражабов, З.К. Шукуров. Ўтказувчан деворли йирик артериал гидравлик қаршилиқларни импеданс методи асосида аниқлаш .....
- И. Мирзаев. Фазовий конструкциялар динамикасини анимацион намоиш этиш.....
- Х.Т. Аҳмедходжаев, А.А. Обидов, М. Султанов. Пахта чигитларининг эгилувчанлик мустаҳкамлигини тадқиқ қилиш.....
- Н.С. Дуняшин, З.Д. Эрматов. Электродлар қопламаси турларини пайвандлаш ваннаси методига таъсирини тадқиқот қилиш масаласига.....
- Г.А. Баҳадиров, А.М. Набиев. Терига ишлов берувчи валикли машинанинг таянч плиталарнинг конфигурацияларининг хусусиятлари .....
- Н.М. Сафаров, Б.М. Мардонов, Х.Т. Аҳмедходжаев. Қуёш қуритиш қурилма ва тўр юза билан биргаликда ҳаракатланаётган пахта хом ашёсини қуритиш жараёнини моделлаштириш.....
- И.Т. Эргашев, Х.Қ. Пардаев. Бог қатор ораларига ҳар хил чуқурликда текис ишлов берувчи қизикли фронтал плуг параметрларини асослаш .....
- М. Абдувахидов, М. Сайидмуродов. Конструкциялар тўпламининг эгилишдаги мустаҳкам назарий асосларини аниқлаш тадқиқотлари.....
- А.А. Мухитдинов, С.К. Рўзимов. Гибрид автомобилнинг куч узатмаси компонентларини имитацион моделлаштириш .....
- Н.З. Саатова, А.А. Ишанходжаев. Туз коррозиясига учраган автотўл қўприқлари темпиратуралик қурилмалари қолдиқ ресурси.....
- Б.Б. Ҳақимов, Х.Х. Нишонов, С.И. Ҳудайкулов. Дизел ёнилғи олувчи ротацион агрегатларнинг диффузион қурилма .....

### Илмий ахборотлар

- А.Р. Джабборов. Ясси тусикка юқори тезликдаги космик заррачаларни зарбидан кратер ҳосил қилиш энергия баланси параметрларини ўрганиш .....
- Р.Б. Хусаинов. Ер ости қувурининг бўйлама тебранишида инерция кучи таъсирини баҳолаш.....
- И.И. Касимов. Полимер ёрдамида модифицияланган ва структура ҳосил қилувчи қўшимча қўйилган йўл битумининг реологик хусусияти.....
- Д.М. Мухаммадиев, Х.А. Аҳмедов, Ф.Х. Ибрагимов. Колосникли панжара билан қўйилган чигитнинг ҳаракатини тадқиқ этиш .....
- У.Т. Жовдиев, С.И. Ҳудайкулов. Дизел