

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СТАЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ С ДВУХСЛОЙНЫМ ЭКРАНОМ ВЫСОКОПОРИСТАЯ МЕДЬ/ДЮРАЛЮМИНИЙ

П. В. Лаврухов, А. В. Пластинин, В. В. Сильвестров

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, silver@hydro.nsc.ru

Исследовано соударение стального шарика диаметром 2 мм, летящего со скоростью  $2 \div 7,3$  км/с, с двухслойными экранами, первый слой которых выполнен из мелкодисперсного медного порошка плотностью  $2,8$  г/см<sup>3</sup>, второй — из дюралюминия. Обнаружено, что при одинаковых скоростях соударения в диапазоне  $3 \div 5$  км/с и равных толщинах и удельных массах экранов двухслойный экран разрушает стальной ударник лучше, чем экран из дюралюминия. Уменьшаются максимальная глубина внедрения осколков в пластину-свидетель и число наиболее крупных кратеров. Порядок расположения слоев экрана заметного влияния на разрушение ударника не оказывает. При повышении скорости удара до 7 км/с различие между защитными свойствами экранов практически исчезает.

Ключевые слова: высокоскоростной удар, двухслойный экран, пористый слой.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается прогресс в развитии конструктивных схем, основанных на идее противометеоритной защиты Уиппла [1], состоящей из тонкого внешнего экрана из алюминия и защищаемой стенки, расположенной на определенном расстоянии от экрана. Было затрачено много усилий на оптимизацию геометрических параметров защит для наилучшего дробления ударника при сохранении общей массы и толщины конструкции. В результате достигнуты значительные успехи в этой области. Например, защита, описанная в [2], при удельной массе  $2,6 \div 3,2$  г/см<sup>2</sup> не пробивается шариком из алюминия диаметром  $17 \div 20$  мм и массой  $7 \div 12$  г, летящим со скоростью до 7 км/с.

Однако неоднократно предпринимались попытки по поиску новых материалов и структуры первого экрана, обеспечивающих лучшее дробление ударника. Например, исследовались композитные экраны с матрицей из алюминия, армированной угольной или борной нитью [3] либо частицами керамики [3, 4]. Но альтернативы первому экрану из дюралюминия пока не найдено. Решение проблемы зависит от детального понимания условий, влияющих на разрушение ударника при взаимодействии с тонкой

пластинкой, а также от параметров удара и прочностных характеристик сталкивающихся материалов. В первом приближении разрушение ударника определяют давление соударения и время взаимодействия ударника с пластинкой. Но существует ряд примеров, когда этих параметров недостаточно для понимания разрушения ударника в конкретных условиях соударения. Например, при одном и том же давлении соударения сферическая частица из карбида вольфрама разрушается лучше при ударе по пластинке из стекла, чем при ударе по пластинке из полиметилметакрилата (ПММА) [5]. Еще один пример приведен ниже. Полной ясности в этом вопросе нет, и в каждом случае необходимо экспериментальное исследование. Другой известный подход к изменению структуры первого экрана — использование слоистых экранов с целью увеличения радиального разброса и степени фрагментации материала ударника [6].

Численно удар цилиндром из алюминия со скоростью 15 км/с по двухслойным экранам из материалов с различными ударными импедансами: Pb/Al, Be/Al, ПММА/Al, Al/Al и Al/ПММА — исследовался в гидродинамическом приближении [6]. Показано, что соотношение ударных импедансов и порядок слоев слабо влияют на полные осевой и радиальный импульсы разлетающегося вещества и основным фактором, определяющим защитное действие метеоритной защиты, является мас-

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 00-01-00794) и гранта Президента РФ (номер НШ-2073.2003.1).

са единицы площади экрана. При высокой скорости соударения, при которой вещество в запреградном облаке находилось в расплавленном состоянии и давление соударения достигало  $2 \div 5$  Мбар, отношение ударных импедансов в диапазоне  $0,2 \div 1,5$  и ударная сжимаемость материалов экрана оказывали слабое влияние на результаты расчета. Отмечено, что в случае более толстых слоевых мишеней и меньших скоростей соударения экспериментальное исследование свидетельствует о неправомерности пренебрежения «вторичными» эффектами, но результаты, доказывающие это утверждение, приведены не были. Действительно, данные при более низких скоростях подтверждают это замечание [7, 8].

Экспериментально соударение шарика из алюминия с двухслойным экраном исследовалось при скорости  $3 \div 8$  км/с (давление соударения  $0,5 \div 1$  Мбар) [7]. Оказалось, что общее число кратеров на пластине-свидетеле, осевая и радиальная скорости разлета запреградного облака осколков зависят от соотношения ударных импедансов и порядка следования слоев. Например, при одинаковой скорости удара соударяющиеся материалы разрушаются лучше в случае использования экрана Ti/W, чем экрана с обратным расположением слоев (W/Ti). По мнению авторов, причина заключается в более высоком среднем давлении соударения в системе ударник/экран в первом варианте расположения слоев. Различие в импедансах достигалось за счет четырехкратного различия плотностей слоев, которые значительно превышали плотность ударника.

При ударе в диапазоне скоростей  $3 \div 5$  км/с (давление соударения  $0,3 \div 0,9$  Мбар) по экранам толщиной 1 мм из высокопористой меди плотностью  $2,2 \div 4$  г/см<sup>3</sup> стальной сферический ударник диаметром 2 мм разрушается вблизи порога разрушения лучше, чем при ударе по экрану из дюралюминия той же толщины при одинаковом давлении соударения [8]. Наблюдаются уменьшение глубины внедрения фрагментов ударника в пластину-свидетель, более интенсивный радиальный разброс и существенное увеличение числа кратеров на пластине-свидетеле. Но ввиду высокой сжимаемости материала для достижения одинакового давления в случае пористого экрана необходима более высокая скорость соударения.

В связи с этим возникла идея использовать этот эффект для построения двухслойного

экрана «высокопористая медь/дюралюминий». Второй слой из дюралюминия добавлен для того, чтобы максимальное давление соударения достигало значения, реализуемого при соударении частицы с экраном из дюралюминия.

В данной работе экспериментально исследуется соударение по нормали стального шарика диаметром 2 мм с двухслойными экранами, первый слой которых выполнен из мелкодисперсного медного порошка, второй — из дюралюминия, в диапазоне скоростей ударника  $2 \div 7,3$  км/с. Различие ударных импедансов слоев обеспечивается более высокой сжимаемостью пористого медного порошка. Цель работы — сравнительное исследование разрушения ударника при соударении с двухслойными экранами и экраном из дюралюминия.

## ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Частица, стальной шарик диаметром 2 мм, ускоренная до скорости  $v_p = 2 \div 7,3$  км/с при помощи трубчатого взрывного ускорителя [9], соударялась по нормали с экраном из исследуемого материала толщиной 2 мм. Скорость ударника определялась с помощью двух импульсных рентгеновских установок. Погрешность определения скорости не более 5 %. При этом контролировалась целостность частицы после взрывного ускорения.

Для наблюдения результатов фрагментации использовалась пластина-свидетель (мишень) из дюралюминия Д16 диаметром 200 мм и толщиной 10 мм. Расстояние между экраном и свидетелем выбрано достаточно большим,  $S_{off} = 150$  мм, для минимизации числа перекрывающихся кратеров.

Между экраном и мишенью находился воздух при атмосферном давлении, действующий как отсекающий наиболее мелких и менее плотных фрагментов экрана. Согласно прямым измерениям [8] вакуумирование пространства между экраном и пластиной-свидетелем до давления 1 Торр не приводит к увеличению максимальной глубины внедрения наиболее крупных фрагментов стальной частицы в мишень.

## Экраны

Двухслойные экраны изготавливали пресованием на пластинке из дюралюминия Д16 толщиной 1 мм мелкодисперсного медного порошка до плотности  $2,8$  г/см<sup>3</sup>, равной плотно-

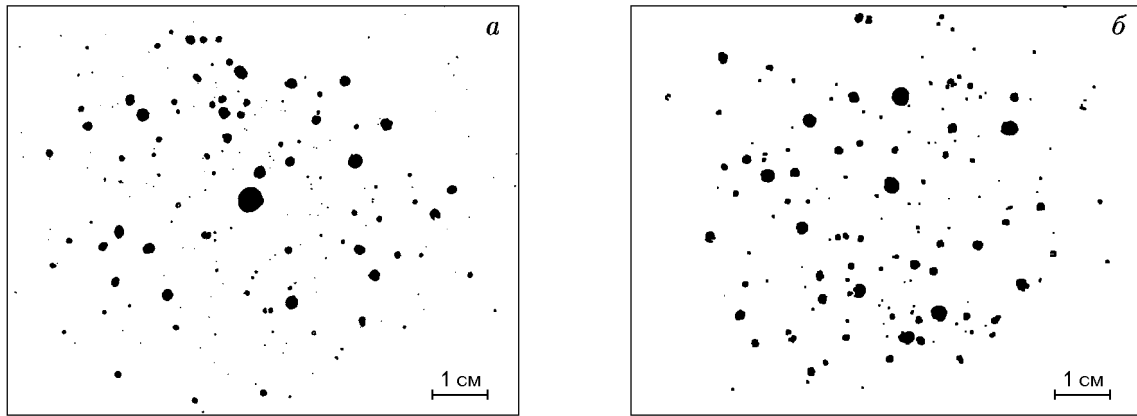


Рис. 1. Вид кратерного поля на пластине-свидетеле при скорости удара 3,5 км/с в опытах с экраном из дюралюминия (а) и двухслойным экраном «высокопористая медь/дюралюминий» (б)

сти дюралюминия. Использовался порошок меди с зернами размером  $10 \div 20$  мкм, окисленными с поверхности. В результате получался двухслойный экран с первым слоем из высокопористой меди толщиной 1 мм и вторым слоем из дюралюминия той же плотности и толщины. Прочность пористого слоя была близка к нулю. Однослойный экран, 2-миллиметровая пластинка из дюралюминия Д16, использовался как стандарт для сравнения. Экраны обоих типов имели одинаковую толщину  $t_p = 2$  мм и удельную массу на единицу площади  $m_b = 0,56$  г/см<sup>2</sup>. Для сравнения было поставлено несколько опытов с двухслойными экранами дюралюминий/Cu<sub>2</sub>O и дюралюминий/фторопласт.

### Обработка кратерного поля на пластине-свидетеле

Перед экспериментом пластина-свидетель полировалась. После опыта мишень слегка обрабатывалась наждачной шкуркой только для того, чтобы убрать венчики кратеров, затрудняющие измерение площадей и диаметра кратеров на уровне начальной поверхности мишени. Типичные изображения кратерных полей показаны на рис. 1.

При помощи оптического сканера с разрешением 600 точек/дюйм (линейное разрешение 42 мкм) были получены цифровые изображения мишеней, которые обрабатывались при помощи специальной программы. В результате определены: общее число кратеров  $N_0$ , площади и эффективные диаметры  $D_c$  всех кратеров в предположении кругового профиля для

$D_c \geq 0,1$  мм, распределение кратеров по их диаметру, координаты «точки удара» как геометрического центра тяжести координат центров всех кратеров, радиальные распределения кратеров относительно центра удара. Ввиду ограниченного разрешения сканера кратеры диаметром менее 0,1 мм не анализировались.

Для 5–6 кратеров наибольшего диаметра измерялась глубина  $h_c$  от уровня начальной поверхности мишени. Далеко не всегда кратер наибольшего диаметра имел наибольшую глубину. Поэтому в каждом опыте определялись как максимальная глубина внедрения фрагментов  $h_{max}$ , так и максимальный диаметр кратеров  $D_{max}$ , которые использовались при оценке защитных свойств экрана.

### Расчет давления соударения и температуры ударного сжатия

Для расчета давления соударения  $p_i$  в одномерном приближении применялся метод диаграмм «давление — массовая скорость». Ударные адиабаты выбирались в следующем виде:  $U_s = 4,57 + 1,49u_p$  для стального ударника и  $U_s = 5,25 + 1,39u_p$  для экрана из дюралюминия [10] ( $u_p$  — массовая скорость за ударной волной). Для расчета ударных адиабат в диапазоне  $20 \div 160$  ГПа и температуры ударного сжатия  $T_s$  для экранов из медного порошка использовалось уравнение состояния для пористых металлов, предложенное в [11]. В случае высокопористых экранов при скорости стального ударника  $2,5 \div 7,3$  км/с температура ударного сжатия материала экрана в области про-

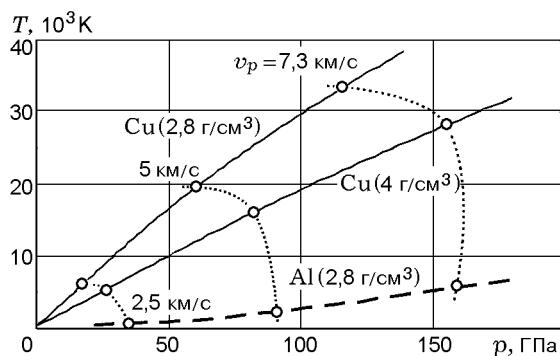


Рис. 2. Ударные адиабаты материалов экранов:

светлые кружки — состояния, достигаемые при указанных скоростях удара стальной частицы

боины достигала  $(7 \div 33) \cdot 10^3$  К и примерно в семь раз превышала температуру ударного сжатия для экрана из дюралюминия (рис. 2).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Степень разрушения ударника характеризуется различными параметрами, из которых наиболее важным является максимальная глубина внедрения фрагментов в мишень  $h_{\max}$ . Существенным фактором является также радиальный разброс фрагментов по пластине-свидетелю, поскольку чем он больше, тем на большую площадь защищаемой стенки рассеиваются кинетическая энергия и импульс ударника. Для анализа разрушения частицы и тестирования моделей фрагментации ударника представляют интерес число кратеров на пластине-свидетеле, соответствующее общему числу фрагментов, и распределение кратеров по размеру.

### Число кратеров

На рис. 3 приведена зависимость числа кратеров от скорости удара для различных экранов. Сплошная кривая на рис. 3 (см. также рис. 4 и 5) проведена по результатам измерений для двухслойных экранов «высокопористая медь/дюралюминий», штриховой линией отмечены данные для экрана из дюралюминия. Вблизи порога разрушения ударника число кратеров составляет  $15 \div 20$  штук. При увеличении скорости удара общее число кратеров линейно растет с темпом  $\approx 200$  кратер/(км/с) и достигает значений 700 и 1300

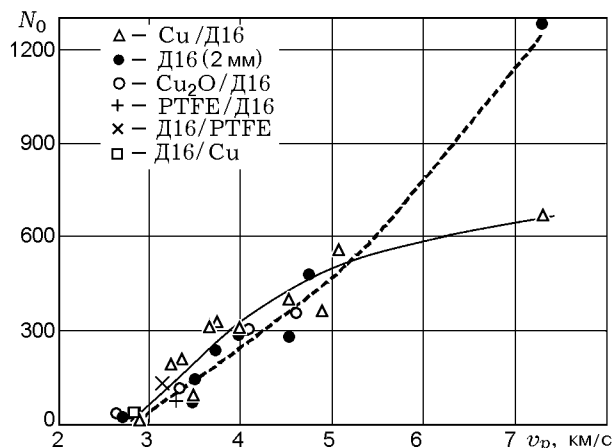


Рис. 3. Число кратеров на пластине-свидетеле в зависимости от скорости удара для различных экранов

при  $v_p \approx 7$  км/с для двухслойного экрана и экрана из дюралюминия соответственно.

В диапазоне скоростей  $2,5 \div 5$  км/с данные для различных экранов лежат практически в пределах экспериментального разброса. Заметное отличие результатов опытов с экраном «пористая медь/дюралюминий» по сравнению с экраном из Д16 при  $v_p = 7,3$  км/с связано, по видимому, с вкладом осколков экрана из дюралюминия в общее число фрагментов и их отсутствием в случае двухслойного экрана.

### Порог разрушения

Пороговое значение скорости удара, при превышении которого ударник разрушается, равно 2,5 км/с для частицы из стали диаметром 2 мм и исследуемых экранов. Значение порогового давления соударения, ниже которого высокоскоростная частица пробивает экран и остается целой, составляет 40 и 23 ГПа при ударе по дюралюминию и пористой меди соответственно. Эти значения соответствуют давлению в первой волне сжатия и примерно на 20 % меньше пороговых давлений для этой же частицы при столкновении с экранами толщиной 1 мм [8], что связано с увеличением времени взаимодействия ударника с экраном за счет двукратного увеличения его толщины. При отражении первой волны от дюралюминия за счет компактирования слоя пористой меди достигается давление, реализуемое при ударе стальной частицы по дюралюминию непосредственно.

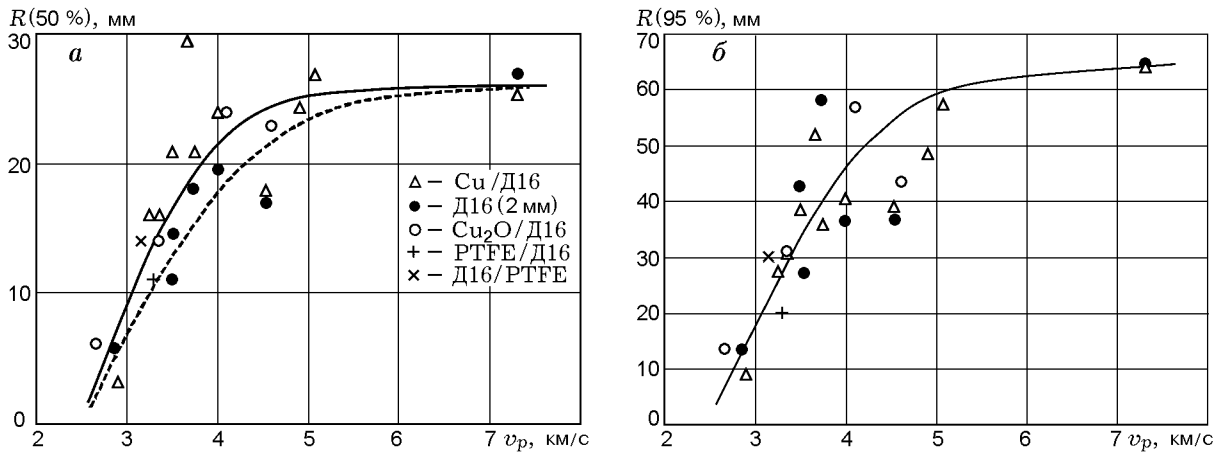


Рис. 4. Зависимость характерных радиусов кратерного поля от скорости удара для различных экранов

### Угловое рассеяние фрагментов

На рис. 4 приведена зависимость характерных радиусов кратерного поля, отражающих угловое рассеяние фрагментов и плотность их распределения по площади пластине-свидетеля, от скорости удара для различных экранов. Здесь  $R(50\%)$  и  $R(95\%)$  — радиусы круга на пластине-свидетеле, внутрь которого попадают кратеры, площадь которых составляет соответственно 50 и 95 % площади всех кратеров. Введение этих параметров позволяет численно охарактеризовать визуальное представление кратерного поля.

Полный угол разлета основной части вещества запреградного облака оценивался как  $\varphi = 2 \arctg(R(95\%)/S_{off})$  и составлял 8 и 46° вблизи порога разрушения частицы и при максимальной скорости удара соответственно. Скорость радиального разлета достигала  $v_r \approx \tg(\varphi/2) v_{ax} \approx 0,13$  и 2,3 км/с (оценка осевой скорости фрагментов  $v_{ax}$  выполнена с учетом уменьшения скорости движения облака осколков согласно закону сохранения импульса [12]).

Анализ данных на рис. 4 показывает, что применение двухслойных экранов не приводит к заметному увеличению максимального радиального рассеяния по сравнению с экраном из дюралюминия. Однако для двухслойных экранов заметна тенденция к более интенсивному разбросу наиболее крупных кратеров, расположенных в центре кратерного поля. На рис. 4,а наблюдается заметное превышение параметра  $R(50\%)$  для двухслойных экранов (сплошная кривая) по сравнению с данными для экрана

из дюралюминия в диапазоне скоростей удара  $3 \div 5$  км/с.

### Глубина внедрения

Данные по максимальной глубине внедрения ( $h_{max}$ ) фрагментов в пластину-свидетель приведены на рис. 5,а. В диапазоне скоростей  $v_p = 3 \div 4,5$  км/с почти все точки для двухслойного экрана «высокопористая медь/дюралюминий» лежат ниже результатов для экрана из дюралюминия.

Пять-шесть наиболее крупных кратеров делятся на две группы по их форме на поперечных разрезах мишени: удлиненные и приблизительно полусферические (рис. 6). Коэффициенты формы для наиболее глубоких кратеров составляют  $h_c/D_c \approx 1,2$  при  $v_p \approx 3,5$  км/с и указывают на то, что эти кратеры образованы фрагментами стального ударника, а не фрагментами экрана из дюралюминия, поскольку для сочетания Al/Al  $h_c/D_c < 0,5$  [13].

Причина образования удлиненных кратеров вполне понятна. При скорости  $v_p \approx 3,5$  км/с, при которой наблюдается максимальное различие глубин внедрения, скорость фрагментов запреградного облака составляет  $\approx 2$  км/с. При таких низких скоростях удара не происходит интенсивного разрушения стального фрагмента, которое способствует «выполаживанию» кратера, и на мишени из дюралюминия образуются кратеры удлиненной формы. Локальный химический анализ наиболее глубоких кратеров, проведенный с помощью рентгеновского микроанализа

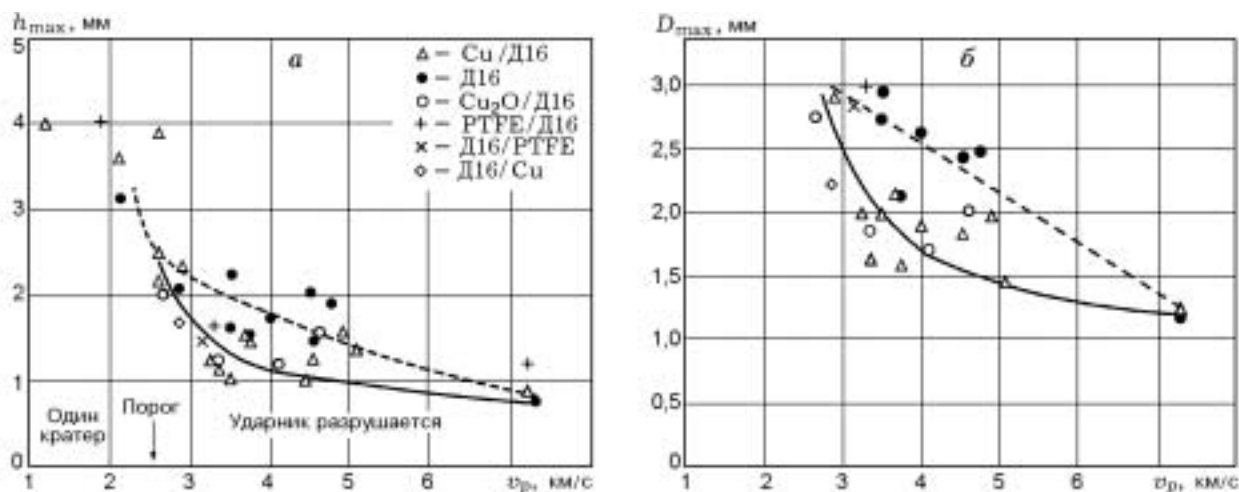


Рис. 5. Максимальная глубина внедрения (а) и диаметр кратера (б) в зависимости от скорости удара для различных экранов

затора «RONTEK» сканирующего электронного микроскопа «LEO-420», подтверждает наличие остатков фрагмента стальной частицы на дне и стенках удлиненного кратера (см. рис. 6). Более светлый (по цвету) фрагмент стального ударника отчетливо виден на дне каверны на рис. 6,а (отмечен стрелкой). Эти наблюдения служат дополнительным подтверждением того, что наиболее глубокие кратеры на пластине-свидетеле образованы фрагментами стального ударника.

Отличительной особенностью кратерного поля при  $v_p = 3 \div 5$  км/с в случае экранов из дюралюминия является расположение кратера наибольшего диаметра практически в центре кратерного поля (см. рис. 1,а). При рентгенохимическом анализе на стенках кратера такого типа обнаружены остатки стального ударника, прошедшие стадию расплава, что указывает на то, что кратер также образован фрагментом стального ударника. Примечательно, что этот кратер имеет форму, близкую к полусферической (форм-фактор  $h_c/D_c \approx 0,6$ , рис. 6,в,г) даже при низкой скорости частицы ( $\approx 3$  км/с), т. е. при скорости фрагментов менее 2 км/с. В области низких скоростей соударения прочность материалов экрана и ударника оказывает существенное влияние на образование кратеров и для пары сталь/дюралюминий в случае сферического ударника коэффициент формы кратера должен иметь значение  $h_c/D_c \approx 1$  [13]. Более плоскую форму кратера можно объяснить, предположив, что в запреград-

ном облаке фрагментов присутствует крупный стальной фрагмент дискообразной формы, который и образует центральный кратер максимального диаметра (отчетливо виден на дне кратера на рис. 6,г).

В случае двухслойных экранов «высокопористая медь/дюралюминий» кратерное поле не имеет четко выраженного центра (см. рис. 1,б). Для экрана из дюралюминия (см. рис. 1,а) вместо одного большого кратера в центре наблюдаются несколько кратеров меньшего размера, разбросанных по поверхности мишени. В результате диаметр наибольшего кратера  $D_{max}$  значительно уменьшается (см. рис. 5,б и 6,в,г). Уменьшение значения  $D_{max}$  превышает статистический разброс данных и достигает 1,5 раз, что указывает на значительно меньший поперечный размер наибольшего фрагмента в запреградном облаке и, следовательно, на лучшее дробление стального ударника двухслойными экранами по сравнению с экранами из дюралюминия. Уменьшение глубины внедрения не столь велико, но тенденция к ее снижению также хорошо заметна (рис. 5,а). При увеличении скорости соударения до 7 км/с различие данных по глубине внедрения для различных экранов практически исчезает, что качественно согласуется с выводами численных расчетов [6].

#### Распределение кратеров по диаметру

На рис. 7 приведены результаты шести опытов при скоростях удара  $v_p \approx 3,5$  км/с и

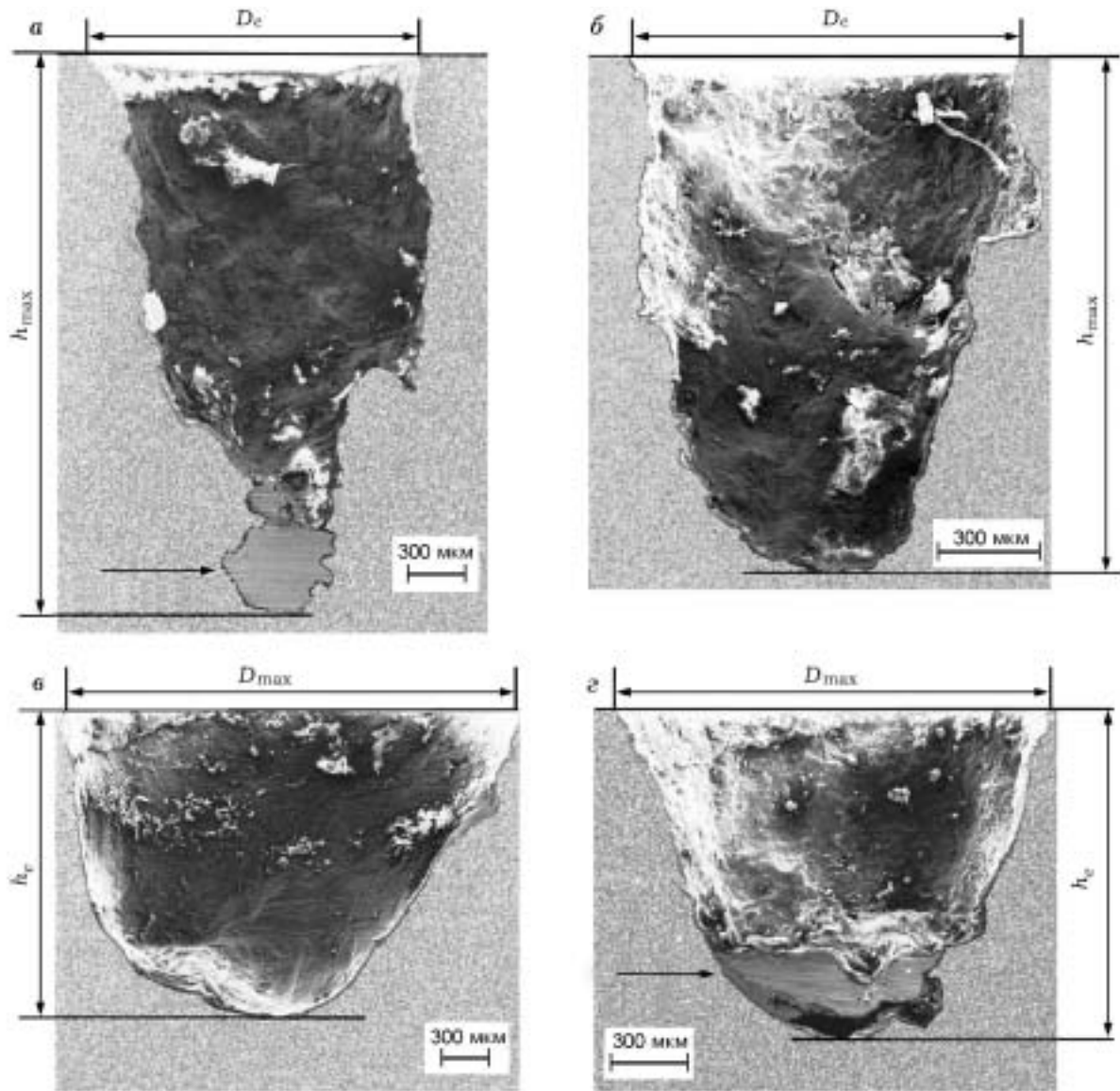


Рис. 6. Поперечные разрезы кратеров, наиболее глубоких (а, б) и имеющих наибольший диаметр (в, г):

а, в — экран из дюралюминия, б, г — двухслойный экран,  $v_p = 3,5$  км/с, стрелкой отмечены остатки наиболее крупного фрагмента стального ударника

4,5 км/с: плотность распределения числа кратеров  $n(D_c)$ , число кратеров с диаметром в интервале  $D - \Delta D < D_c \leq D$  при  $\Delta D = 0,25$  мм и кумулятивное число кратеров на мишени  $N(\geq D_c)$ , число кратеров с диаметром больше текущего (шаг по диаметру 0,1 мм). Несмотря на значительный разброс в общем числе кратеров (см. рис. 3 и подпись к рис. 7), видно, что в области «крупнодисперсного хвоста» число кратеров диаметром более 1,25 мм при ударе по экрану из дюралюминия больше соответствующего

числа кратеров для двухслойного экрана. Число мелких кратеров ( $D_c \leq 1$  мм), наоборот, заметно больше в случае двухслойных экранов. Эти данные также указывают на то, что двухслойные экраны с пористым слоем разрушают стальной ударник лучше, чем экран из дюралюминия той же толщины.

При повышении скорости соударения до 7 км/с различие между однослойными и двухслойными экранами практически исчезает. Наибольшие кратеры на пластине-свидетеле

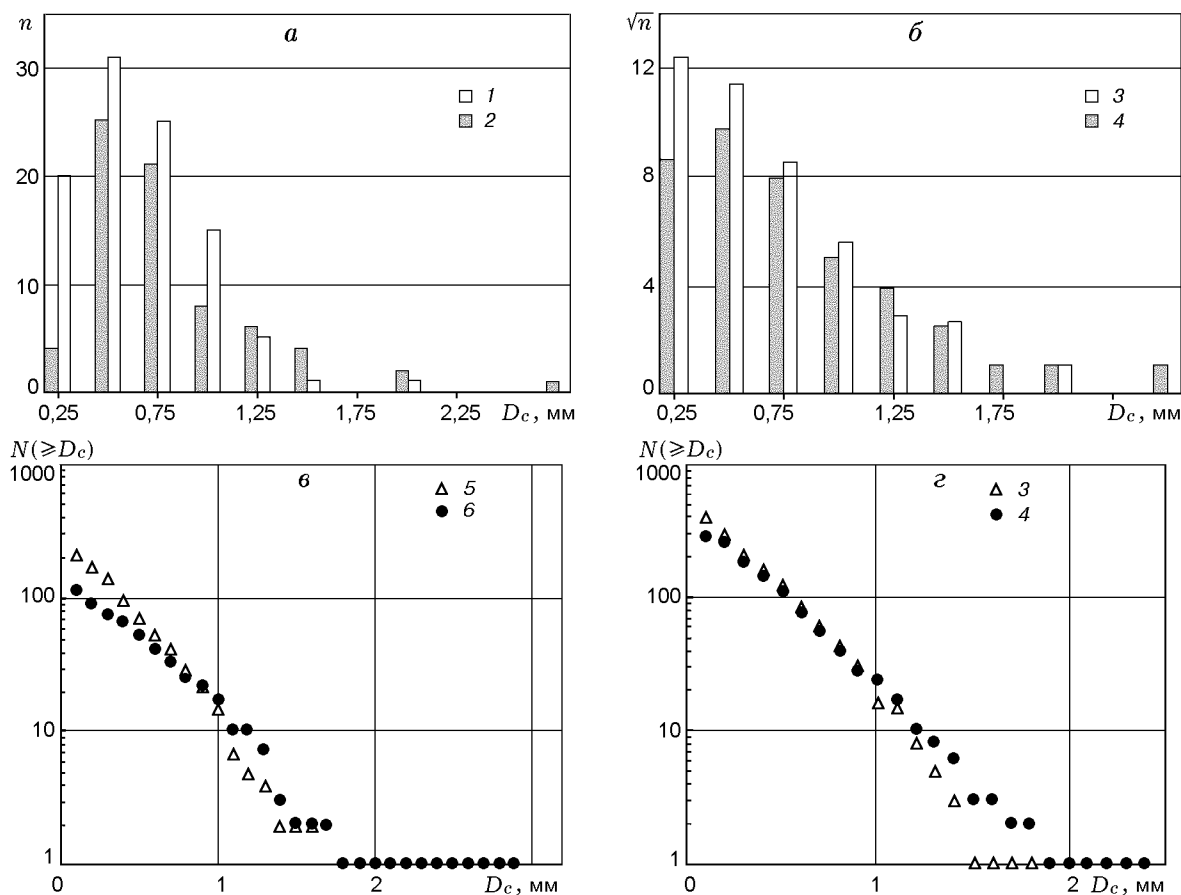


Рис. 7. Зависимость плотности распределения кратеров (*a*, *б*) и их кумулятивного числа (*в*, *г*) от диаметра кратера при различных скоростях ударника:

1 — Cu/D16,  $v_p = 3,5$  км/с,  $N_0 = 98$ ; 2 — D16,  $v_p = 3,5$  км/с,  $N_0 = 74$ ; 3 — Cu/D16,  $v_p = 4,5$  км/с,  $N_0 = 402$ ; 4 — D16,  $v_p = 4,5$  км/с,  $N_0 = 281$ ; 5 — Cu/D16,  $v_p = 3,4$  км/с,  $N_0 = 211$ ; 6 — D16,  $v_p = 3,5$  км/с,  $N_0 = 114$

имеют примерно одинаковые глубины и диаметры в экспериментах с разными экранами (см. рис. 5). Но наблюдается примерно двухкратное различие как в общем числе кратеров (см. рис. 3), так и в плотности их распределения (рис. 8). Это обусловлено увеличением вклада фрагментов материала экрана из дюралюминия толщиной 2 мм в общее число осколков в запреградном облаке. Максимальное давление соударения в экранах достигает 160 ГПа и достаточно велико, чтобы детали взаимодействия ударника с экраном не влияли на фрагментацию стального ударника.

Таким образом, есть все основания полагать, что в диапазоне  $v_p = 3 \div 5$  км/с экран «медный порошок/дюралюминий» разрушает стальную частицу лучше, чем экран из дюралюминия, при одинаковых толщине и удельной массе экранов: наблюдаются меньшая глубина внедрения фрагментов ударника в мишень

и меньшее число крупных вторичных кратеров (иначе, меньшее число больших фрагментов частицы) на пластине-свидетеле.

#### Возможные причины лучшего разрушающего действия пористого слоя

Остановимся на качественном объяснении наблюдаемого эффекта. Существует несколько причин для лучшего разрушения ударника двухслойными экранами с пористым слоем, но какая из них является основной, определить пока не представляется возможным. В действительности, все рассмотренные ниже факторы могут влиять на процесс разрушения.

**Ступенчатое нагружение ударника.** Возможно, лучшее разрушение частицы двухслойным экраном связано со ступенчатым характером нагружения ударника при соударении с двухслойным экраном. Первая ударная волна воз-



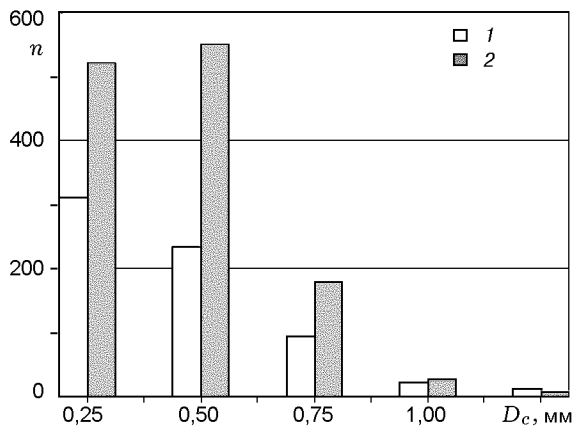


Рис. 8. Плотность распределения числа кратеров при  $v_p = 7,3$  км/с:

1 — Cu/D16,  $N_0 = 671$ ; 2 — D16,  $N_0 = 1281$

никает при соударении частицы с первым пористым слоем. Вторая ударная волна образуется при отражении первой волны от слоя из дюралюминия, ударный импеданс которого больше. Последовательное нагружение тела ударника двумя ударными волнами происходит в условиях интенсивной боковой разгрузки, обусловленной конечным поперечным размером ударника. Под действием первой серии волн нагрузка/разгрузка не только образуются магистральные трещины, разделяющие ударник на отдельные фрагменты, но и появляются центры разрушения внутри объема фрагментов. Эти центры затем активируются во второй серии волн нагрузка/разгрузка, что приводит к появлению добавочных трещин, способствующих дополнительному дроблению наиболее крупных осколков ударника.

При  $v_p = 2,9$  км/с был поставлен эксперимент с обратным расположением слоев (дюралюминий/высокопористая медь). Оказалось, что порядок следования слоев экрана практически не влияет на разрушение частицы, так как параметры кратерного поля примерно те же, что и при прямом следовании слоев (см. рис. 5). Этот результат не совпадает с выводами в [7], что можно объяснить тем, что в [7] использовались ударник из алюминия и более плотные и прочные материалы экрана (титан и вольфрам). Поэтому основной вклад в запреградное облако фрагментов давали осколки материалов экрана. И различие кратерных полей на пластине-свидетеле при разном расположении слоев вызвано именно ухудшением условий дробления материалов экрана при обрат-

ном расположении слоев (W/Ti). В наших же экспериментах основной вклад в облако фрагментов давали фрагменты стального ударника, условия дробления которого близки при обоих вариантах расположения слоев, так как ударник нагружался до одинакового конечного давления в обоих случаях за счет полного компактирования пористого слоя в структуре экрана.

В двух контрольных экспериментах вместо высокопористой меди были использованы пластинки ( $t_b \approx 2,2$  мм,  $m_b = 0,56$  г/см<sup>2</sup>) из тефлона (PTFE). Вид кратерного поля практически не отличался от наблюдаемого для экрана из дюралюминия (см. рис. 1,а). В этом случае также реализуется ступенчатое нагружение ударника и наблюдается уменьшение максимальной глубины внедрения фрагментов в мишень (см. рис. 5,а, данные помечены прямыми крестиками). Однако максимальный диаметр кратера увеличивается (см. рис. 5,б), и в распределении кратеров по диаметру не наблюдается уменьшения числа крупных кратеров. При изменении порядка следования слоев (данные помечены косыми крестиками) результаты не изменяются. Но интерпретация результатов этого опыта, поставленного для выяснения причины лучшего дробящего действия двухслойных экранов, неоднозначна, так как в этом случае параметры нагружения прослойки из тефлона даже выше, чем при прямом расположении слоев. Эти результаты показывают, что только ступенчатое нагружение не является причиной лучшего разрушения ударника.

**Высокая температура ударно-сжатого материала пористого экрана.** Другая причина лучшего разрушающего действия пористого слоя может быть связана с его высокой сжимаемостью. При  $v_p = 3 \div 7$  км/с температура ударного сжатия пористой меди достигает значения  $T_s \approx (9 \div 33) \cdot 10^3$  К, что в  $6 \div 25$  раз превышает температуру плавления меди (см. рис. 2). Плотность тепловой энергии составляет  $10 \div 20$  кДж/г и превышает энергию сублимации меди, равную 4,75 кДж/г. В этих условиях медь за фронтом ударной волны находится в жидком состоянии.

Оценим энтропию за фронтом ударной волны по формуле [14, § 22]

$$S(T, V) \approx S_0 + c_v \ln \frac{T}{T_0} + \beta_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{\frac{1}{2}} (T - T_0).$$

Здесь  $V$  — объем,  $S_0 = 7,96$  кал/(моль·К) — энтропия металлической меди [15],  $\beta_0 = 0,011$  Дж/(кг·К<sup>2</sup>) — электронная теплоемкость

при нормальных условиях. Подставляя в формулу параметры ударной волны, рассчитанные по уравнению состояния [11], и учитывая уменьшение теплоемкости при плавлении до  $c_v = \frac{3}{2}R$ , где  $R$  — универсальная газовая постоянная, получим значение энтропии за фронтом ударной волны в материале экрана, равное  $S \approx 23$  кал/(моль·К) при скорости ударника  $v_p = 5$  км/с. Это значение меньше энтропии для меди в критической точке,  $S_{cr} = 35,3$  кал/(моль·К) [16, табл. 9.2], при превышении которого согласно энтропийному критерию [14] происходит полное испарение материала при разгрузке. Это означает, что при разгрузке медь остается перегретой жидкостью и, возможно, частично испаряется. В результате возможно течение материала экрана в сторону ударника, что приводит к увеличению времени взаимодействия ударника с экраном и к его более интенсивной фрагментации.

Еще одна возможная причина рассматриваемого эффекта связана с характером деформирования материала экрана в области соударения. При относительно низкой скорости удара вблизи порога разрушения частицы, когда материал ударника еще не подвергается интенсивному пластическому течению, в зоне удара происходит своеобразное гидродинамическое «обтекание» тела ударника материалом экрана. Если по каким-либо причинам пластическое течение последнего затруднено, например, элемент экрана выполнен из хрупкого или очень твердого вещества, то ударник будет испытывать большее динамическое сопротивление и, соответственно, лучше дробиться. На это указывают результаты отдельных контрольных экспериментов, в которых в качестве материала первого слоя использовался медный порошок с зёрнами, не покрытыми оксидами с поверхности, или порошок  $\text{Cu}_2\text{O}$  ( $t_b \approx 1,9$  мм,  $m_b \approx 0,56$  г/см<sup>2</sup>). В первом случае результаты практически совпадали с данными для экранов из дюралюминия. Во втором случае наблюдались те же эффекты, что и для экранов с первым слоем из окисленного с поверхности медного порошка (см. рис. 3–5, светлые кружки).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружено, что двухслойный экран «высокопористая медь/дюралюминий» разрушает стальной сферический ударник лучше, чем

экран из дюралюминия при одинаковых скоростях соударения от 3 до 5 км/с и равных толщине и удельной массе экранов. Уменьшаются максимальная глубина внедрения осколков в пластину-свидетель и число наиболее крупных кратеров на ней. Порядок расположения слоев экрана не оказывает заметного влияния на разрушение ударника. При повышении скорости до 7 км/с различие между защитными свойствами экранов практически исчезает. Последние два вывода находятся в качественном соответствии с численными результатами Рини [6].

Причины, по которым рассмотренный двухслойный экран эффективнее разрушает стальной сферический ударник, неясны. Возможно, лучшее разрушение высокоскоростной частицы связано со ступенчатым характером нагружения ударника при его соударении с двухслойным экраном или с сильным разогревом вещества высокопористой части экрана в области пробоины. В результате может увеличиваться эффективное время взаимодействия частицы с экраном и происходить более интенсивная фрагментация ударника.

Представляет интерес проверка обнаруженного эффекта при соударении с двухслойными экранами стеклянных частиц, моделирующих по плотности и прочности каменные метеориты. За счет меньшей прочности материала ударника эффект может быть более значительным. Целесообразно также испытание в качестве пористого слоя высокопористых металлов, производимых металлургическими методами и обладающих конструктивной прочностью [17].

Результаты работы показывают, что применение высокопористых металлических прокладок в структуре первого экрана может быть полезным для повышения эффективности противометеоритной защиты Уиппла.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Whipple F. L. Meteorites and space travel // *Astronom. J.* 1947. V. 52, N 1161. P. 131.
2. Christiansen E. L., Kerr J. H., De La Fuente H. M., Schneider W. C. Flexible and deployable meteoroid/debris shielding for spacecraft // *Intern. J. Impact Engng.* 1999. V. 23, N 1. P. 125–136.
3. Robinson J. H., Nolen A. M. An investigation of metal matrix composites as shield for hypervelocity orbital debris impacts // *Intern. J. Impact Engng.* 1995. V. 17, N 1–6. P. 685–696.

4. **Сильвестров В. В., Пластинин А. В., Пай В. В., Яковлев И. В.** Исследование защитных свойств экранов из композита керамика/алюминий при высокоскоростном ударе // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 3. С. 126–132.
5. **Grady D. E.** Impact failure and fragmentation properties of tungsten carbide // Intern. J. Impact Engng. 1999. V. 23, N 1. P. 307–317.
6. **Рини Т.** Численное моделирование явлений при высокоскоростном ударе // Высокоскоростные ударные явления / Пер. с англ. под ред. В. Н. Николаевского. М.: Мир, 1973. С. 164–219.
7. **Stilp A. J., Weber K.** Debris clouds behind double-layer targets // Intern. J. Impact Engng. 1997. V. 20, N 6–10. P. 765–778.
8. **Лаврухов П. В., Пластинин А. В., Сильвестров В. В.** Разрушение стальной сферической частицы при соударении с высокопористыми экранами // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37, № 6. С. 102–112.
9. **Титов В. М., Швецов Г. А.** Лабораторные методы высокоскоростного метания твердых тел взрывом // Физика горения и взрыва. 1970. Т. 6, № 3. С. 401–404.
10. **Compendium of Shock Wave Data** / M. van Thiel (Ed.). NLLL, UCRL-50108. 1977.
11. **Кормер С. Б., Фунтиков А. И., Урлин В. Д., Колесникова А. Н.** Динамическое сжатие пористых металлов и уравнение состояния с переменной теплоемкостью при высоких температурах // ЖЭТФ. 1962. Т. 42, № 3. С. 686–702.
12. **Титов В. М., Фадеев Ю. И.** Сквозное пробивание при метеоритном ударе // Космич. исслед. 1972. Т. 10, № 4. С. 589–595.
13. **Свифт Х. Ф.** Механика соударения со сверхвысокими скоростями // Динамика удара. М.: Мир, 1985. С. 173–197.
14. **Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П.** Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1969. Гл. 11.
15. **Справочник химика.** Л.: Химия, 1971. Т. 1. С. 786.
16. **Канель Г. И., Разореннов С. В., Уткин А. В., Фортов В. Е.** Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996. Гл. 9.
17. **Анциферов В. Н., Храмцов В. Д.** Высокопористые проницаемые ячеистые металлы и сплавы. Области применения // Перспективные материалы. 2002. № 2. С. 23–28.

*Поступила в редакцию 21/IV 2003 г.*