

Стекло и метеориты

И. И. Кравченко

12 августа 2026 г.

Решаем задачу по физике про наложение и отражение волн из сборника Савченко [1]. Опубликовано впервые на [«Savchenko Solutions»](#).

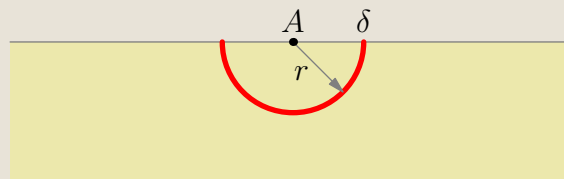
3.8.7. На внешней стороне стекла иллюминатора космического корабля имеются разрушения, вызванные попаданием микрометеоритов. Подобные же разрушения видны на внутренней стороне. Объясните их появление.



1 Волна сжатия

Качественное объяснение удобно провести через сферические волны.

Итак, метеорит ударяется о внешнюю границу стекла. Линейный размер области удара пусть много меньше толщины разрушения в месте удара (основное разрушение). На расстояниях порядка толщины основного разрушения в стекле движется бегущая сферическая волна (выглядит как полусферическая в стекле действительно) с центром волнового фронта в месте удара. Это волна сжатия и посчитаем ее толщину δ много меньше толщины основного разрушения (тонкая волна).



В точке A был удар; r есть расстояние от места удара до волны.

Продолжим рассуждения без учета каких-либо потерь энергии для тонкой сферической волны, которую в каждый данный момент по тонкой геометрии можно представить как состоящую из множества плоских волн, расходящихся в свою сторону.

Пусть изменение давления ΔP в нашей волне одинаково в каждый момент по всей толщине ее δ . Энергия в волне из соотношения для плоских равна:

$$W = 2\pi r^2 \delta \cdot E \varepsilon^2,$$

где $2\pi r^2\delta$ — объем волны на расстоянии r от места удара, $E\varepsilon^2$ — плотность энергии волны (тут E — модуль Юнга, ε — относительная деформация).

Откуда с учетом $\Delta P = E\varepsilon$

$$\Delta P = \sqrt{\frac{EW}{2\pi\delta}} \cdot \frac{1}{r}.$$

С расстоянием от точки удара изменение давления в волне падает. Можем считать, что волна смогла разрушить стекло на расстоянии d (толщина основного разрушения), но не более, значит, максимальное выдерживаемое изменение давления сжатия

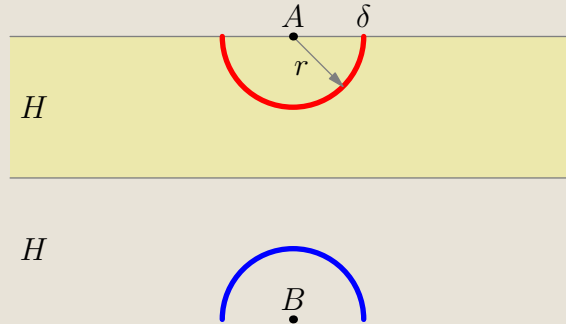
$$\Delta P_{\text{сж. max}} = \sqrt{\frac{EW}{2\pi\delta}} \cdot \frac{1}{d}. \quad (1)$$

Распространяясь сферическим куполом изменение давления в волне убывает с расстоянием, и при $r > d$ до касания внутренней грани (стороны стекла) изменение давления сжатия меньше $\Delta P_{\text{сж. max}}$ и стекло не разрушается.

2 Волна растяжения

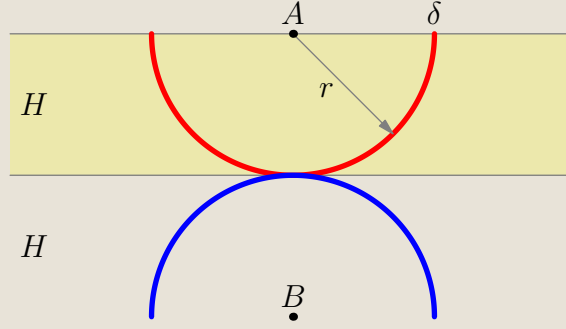
Обозначим толщину стекла H .

Пусть внутренняя грань идеально свободная. Мы знаем по задаче 3.8.5 (Савченко), что после касания фронта волны сжатия внутренней грани стекла возмущение в стекле будет результатом наложения этой прямой волны сжатия и такой же обратной волны, но растяжения, движущейся симметрично относительно свободной грани навстречу прямой волне. Обратная волна исходит как будто из точки на расстоянии $2H$ от реального места удара.



Здесь B есть мнимая точка истока обратной волны.

Не будем рассматривать тонкую область наложения прямой и обратной волн. Скажем, что через время $\delta/(2c)$ после касания прямой внутренней грани, где c — скорость распространения волны в стекле, на расстоянии $\delta/2$ от внутренней грани начнется появление возмущения чистого растяжения — это обратная волна, середина которой движется к точке удара метеорита.



Именно с этого момента может начать разрушаться стекло через растяжение, так как прочность стекла на растяжение значительно меньше(!), чем на сжатие. Разрушение растяжением упрощенно может быть в области, где побывает только обратная волна.

В нашей модели для края разрушения растяжением (на внутренней грани стекла), толщина которого пусть b , мы запишем формулу (1) применительно к обратной волне по справедливости из симметрии прямой и обратной волн:

$$\Delta P_{\text{рас. max}} = \sqrt{\frac{EW}{2\pi\delta}} \cdot \frac{1}{H+b}. \quad (2)$$

Разделим (1) на (2) и выразим b :

$$b = \frac{\Delta P_{\text{сж. max}} d - \Delta P_{\text{рас. max}} H}{\Delta P_{\text{рас. max}}}.$$

Условие существования разрушения внутри есть $b > 0$, что на предыдущее накладывает

$$\Delta P_{\text{сж. max}} d - \Delta P_{\text{рас. max}} H > 0$$

или

$$d > \frac{\Delta P_{\text{рас. max}}}{\Delta P_{\text{сж. max}}} H.$$

При таких толщинах основного разрушения появятся разрушения на внутренней стороне.

Посмотрите, что эта модель дает близкое значение толщины откола снутри по рисунку к задаче для обычных стекол с $\frac{\Delta P_{\text{рас. max}}}{\Delta P_{\text{сж. max}}} \sim 0,1$.

В книге «Физика в задачах» так же под ред. О.Я. Савченко 2013 г. авторы в одной из задач предлагают тот же сюжет, но на расчет $\frac{\Delta P_{\text{рас. max}}}{\Delta P_{\text{сж. max}}}$.

Посмотреть результаты экспериментов по ударам метеоритов о стекло в статье [7] из Новосибирска.

Литература

- [1] И. И. Воробьев, П. И. Зубков, Г. А. Кутузова, О. Я. Савченко, А. М. Трубочев и В. Г. Харитонов. *Задачи по физике*. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2008.

- [2] В. И. Феодосьев. *Сопротивление материалов*. Наука, 1986.
- [3] С. Г. Андреев и др. *Физика взрыва*. Наука, 2004.
- [4] М. А. Исакович. *Общая акустика*. Наука, 1979.
- [5] И. Е. Иродов. *Волновые процессы*. Бином, 2015.
- [6] Д. В. Сивухин. *Общий курс физики. Механика*. Наука, 1979.
- [7] В. М. Титов (Новосибирск). «Особенности разрушений при ударе метеорита по стеклу». В: *ПМТФ* 4 (1976).
- [8] Ю. М. Волченко. *Научная графика на языке Asymptote*. 2018.
- [9] Charles Staats III. *Пособие по Asymptote*. 2022.