

МОЩНЫЕ ЛАЗЕРЫ

ЛЕКЦИЯ 10: ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИШЕНИ

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИШЕНИ

Литература:

1. *Н.Б. Делоне, Взаимодействие лазерного излучения с веществом, М., Наука, 1989, 275 с.*
2. *Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Конспект лекций под редакцией В.П. Вейко. Часть I Поглощение лазерного излучения в веществе, Часть II. Лазерный нагрев и разрушение материалов - СПб: СПб ГУ ИТМО, 2008. - 141 с.*
3. *А.С. Борейшо, С.В. Ивакин / Лазеры: устройство и действие, СПб, Лань, 2016, 300 с.*
4. *Campbell I.W. Project ORION: Orbital debris removal using ground-based sensors and lasers // NASA Technical Memorandum 108522. – 1996.*
5. *А. В. Андреев, В. М. Гордиенко, А. Б. Савельев, / Обзор. Ядерные процессы в высокотемпературной плазме, индуцируемой сверхкоротким лазерным импульсом / Квант. электрон., 2001, т. 31, № 11, с. 941–956*

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИШЕНИ

Характер и эффективность воздействия электромагнитных волн лазерного излучения на вещество определяется плотностью потока энергии (плотностью мощности или интенсивностью) электромагнитного поля.

В любом случае лазерного теплового воздействия на материалы важна не просто мощность лазерного излучения, а мощность, поглощенная материалом и идущая на получение полезного результата.

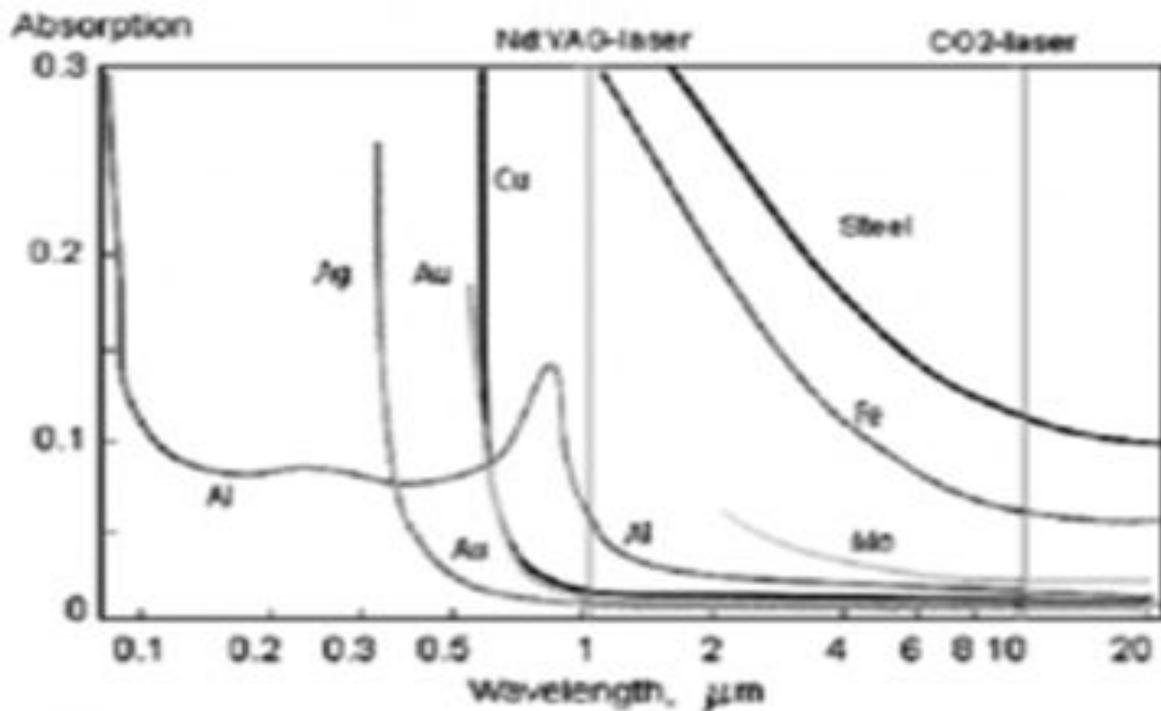


На первой стадии теплового воздействия лазерного излучения на материал, фазовое состояние твердого тела не успевает измениться. Основные явления в этом случае заключаются в отражении и поглощении излучения поверхностью, нагревании поверхности, распространении тепла в глубь среды за счет теплопроводности.

Большое значение имеет в ряде случаев качество обработки поверхности (например, для металлов). Макроскопически шероховатая поверхность представляет собой большое число микроскопических участков, ориентированных под разными углами к направлению падения световой волны, а поэтому характеризующихся различным значением коэффициента отражения, в этом случае наблюдается рассеяние света поверхностью. Зависимость коэффициента

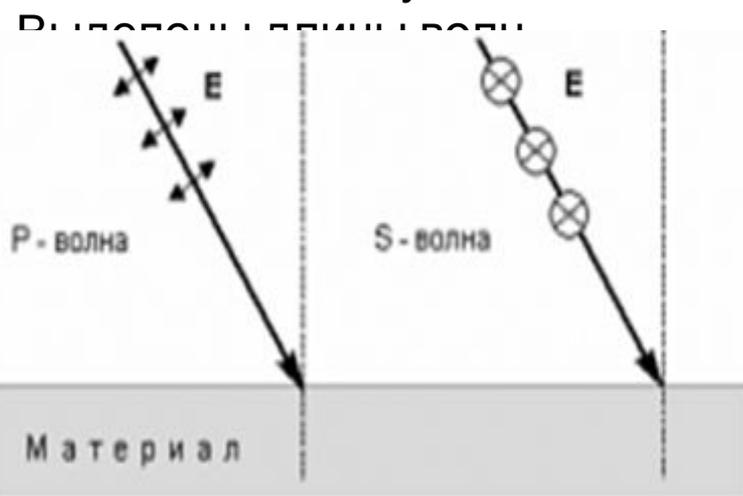
ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИШЕНИ

Поглощенная энергия распространяется в веществе за счет различных механизмов теплопроводности. Для металлов основной является электронная теплопроводность. Коэффициент поглощения веществ зависит от длины волны света, На рис. приведены коэффициенты поглощения некоторых металлов в зависимости от длины волны излучения.



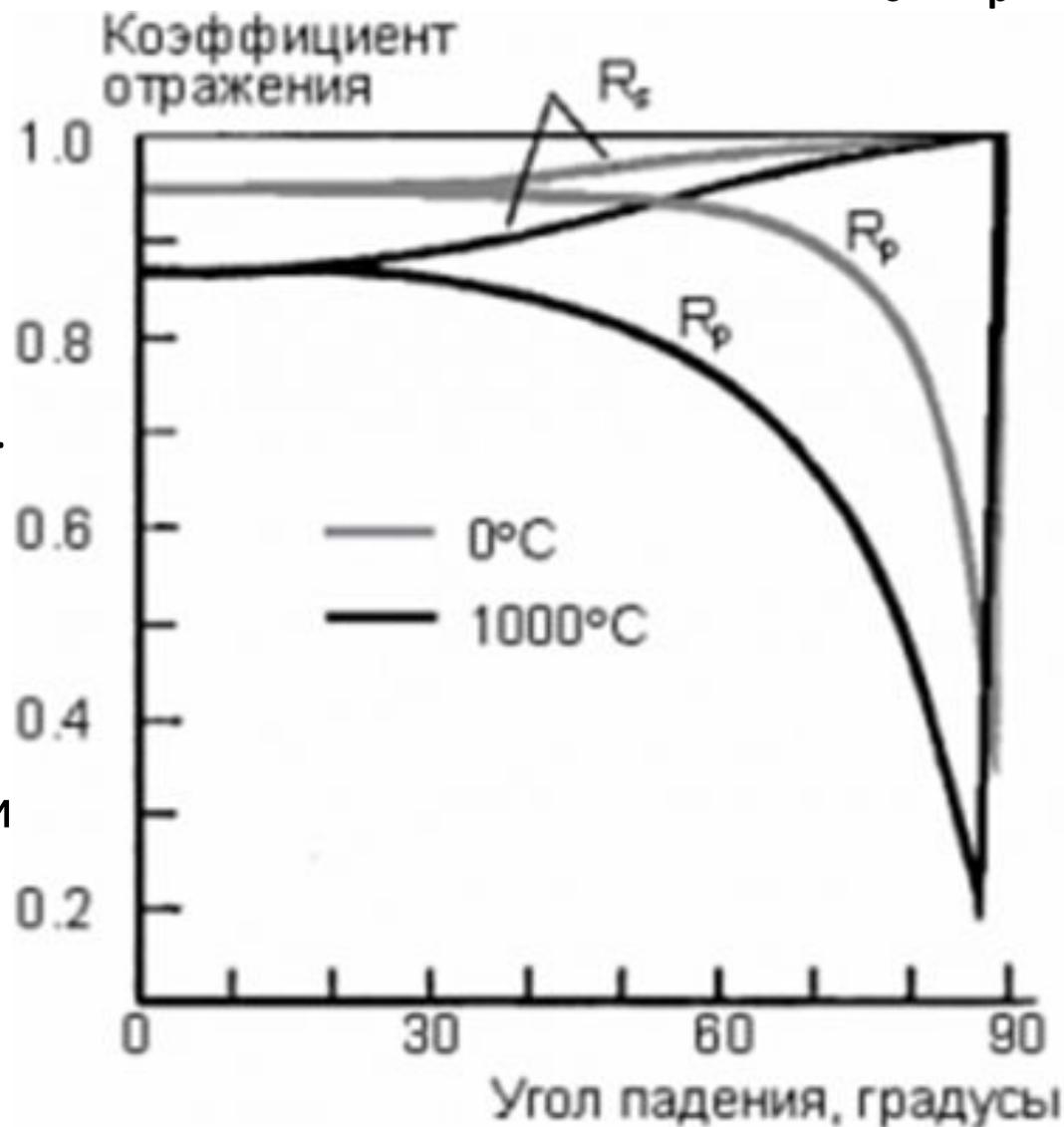
При наклонном падении лазерного излучения на поверхность отражение зависит от поляризации.

Отражательные способности R_p -составляющей, в плоскости падения луча, и R_s -составляющей, перпендикулярной плоскости падения луча, в общем случае различны. Это означает, что отражательная способность поляризованного лазерного излучения зависит от ориентации вектора поляризации относительно поверхности металла и от оптических свойств его поверхности.



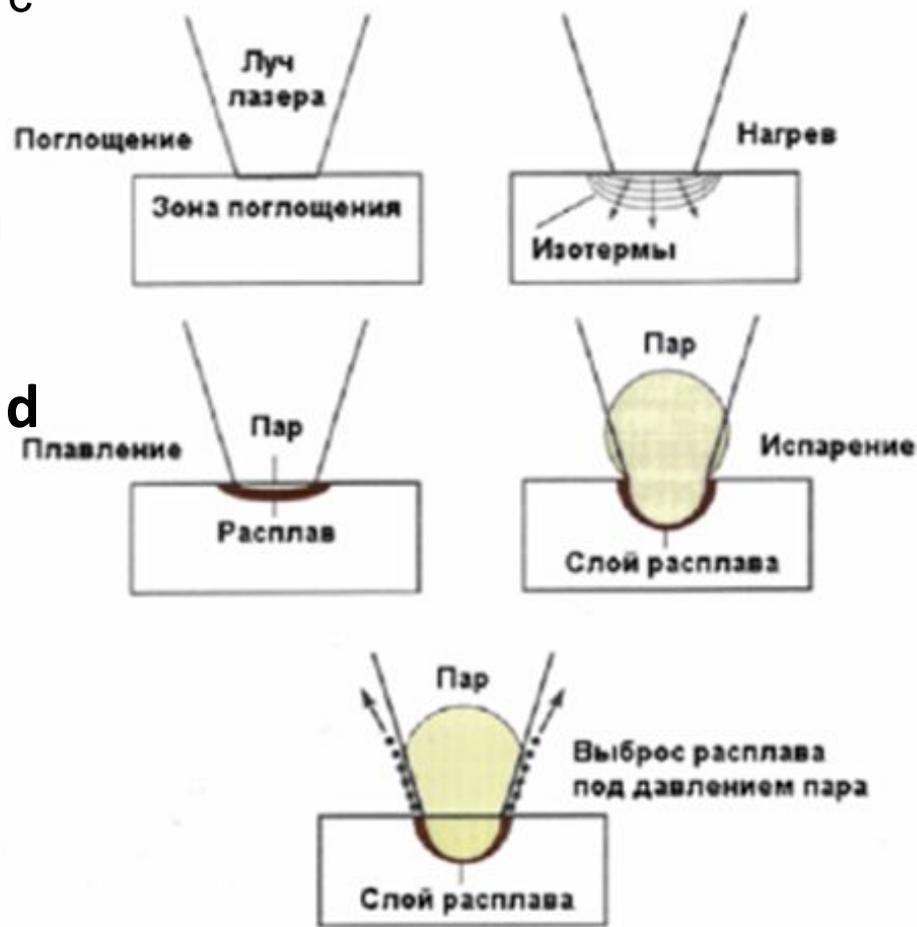
ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИШЕНИ

Для примера, зависимость отражательной способности меди (при $T = 0^{\circ}\text{C}$ и 1000°C) на длине волны $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$ для двух составляющих R_s и R_p приведены на рис. Видно, что значение R_s велико при всех углах падения. В то же время значения R_p достигает минимума при угле, близком (но не равном) 90° , который носит название угла Брюстера. Отсюда следует, что с точки зрения поглощения излучения поверхностью воздействие излучения оптимально случае, когда вектор электрического поля лежит в плоскости падения (R_p -отражение).



ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИШЕНИ

Воздействие лазера может происходить с различными временными характеристиками: непрерывное, импульсное, и импульсно-периодическое. Если воздействие ведется движущимся лучом непрерывного лазера, то характерное время воздействия излучения на точку поверхности составляет $t_v = d/v$, здесь d - диаметр пятна фокусировки излучения на поверхности, v - скорость движения луча. При использовании импульсного лазера, если длительность импульса $T_p \ll t_v$ время воздействия равно T_p . Импульсно-периодическое воздействие может приводить к чисто аддитивному накоплению результата воздействия отдельного импульса, а также и к некоторым специфическим последствиям, таким как резонансное возбуждение гидродинамических колебаний расплава или измельчение зерен кристаллической структуры при циклическом тепловом



Различные стадии теплового воздействия лазерного излучения на поверхность материала: нагрев, плавление, испарение и выплеск жидкой фазы давлением отдачи паров

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИШЕНИ

В дальнейшем будем рассматривать только ту часть падающего излучения, которая поглощается в приповерхностном слое, поскольку отраженная часть легко учитывается соответствующим коэффициентом (отражения) $k_{\text{отр}}$.

НАГРЕВ И ИСПАРЕНИЕ

Минимально возможный размер пятна лазерного луча d на расстоянии L от источника задается так называемым дифракционным пределом и примерно можно оценить как:

$$d \approx (\lambda / D_{\text{ВЫХ}}) \cdot L$$

где λ – длина волны лазерного излучения, а $D_{\text{ВЫХ}}$ – диаметр выходной апертуры лазера.

Аналогичное рассмотрение случая, когда пучок фокусируется в точку, показывает, что вместо точки в фокальной плоскости образуется пятно поперечным размером:

$$d \approx (\lambda / D) \cdot f$$

где f – фокусное расстояние оптической системы, D – диаметр пятна на выходной апертуре фокусирующей системы.

С точки зрения эффективности лазерного воздействия важно, чтобы размеры пятна на мишени были минимальными, т. е. расстояние до цели должно равняться фокусному расстоянию.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИШЕНИ

При расфокусировке размеры пятна возрастают:

$$d^2 \approx \left(\frac{\lambda}{D} \cdot L \right)^2 + \left(\frac{D}{L} \cdot \Delta L \right)^2$$

где $\Delta L/L$ - степень расфокусировки.

Однако, если размер сфокусированного пятна на мишени достаточно мал, то мала и «глубина резкости» ΔL , т. е. повышаются требования к точности системы наведения.

Для непрерывного излучения плотность энергии лазерного излучения q [Дж/м²], поглощенного поверхностью мишени составляет:

$$q \approx \frac{(1 - k_{\text{отр}}) \cdot P \cdot t}{L^2 \cdot \theta^2}$$

где: $P_{\text{ср}}$ [Вт] – средняя мощность источника,

t [с] – длительность работы лазера,

L [м] – расстояние до мишени,

θ [рад] – угол расходимости лазерного излучения.

В случае импульсного излучения:

$$q \approx \frac{(1 - k_{\text{отр}}) \cdot E_{\text{имп}}}{L^2 \cdot \theta^2}, \text{ где } E_{\text{имп}} \text{ [Дж]} - \text{энергия лазерного импульса.}$$

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИШЕНИ

Параметр B [Дж/рад²] называется яркостью и определяет количество энергии, выделяемое источником в единицу телесного угла. Это важная энергетическая характеристика лазерного источника.

$$B \approx (P \cdot t) / \theta^2 \approx E_{\text{имп}} / \theta^2$$

Если ввести понятие энергетического порога поражения q_0 , то, используя параметр B , написать формулу для дистанции поражения цели лазерным лучом (для простоты будем считать в дальнейшем $k_{\text{отр}} = 0$):

$$R \approx (B/q_0)^{1/2}$$

Для процесса поглощения важны длительность лазерного импульса и температуропроводность материала. Если температуропроводность материала велика, то даже за небольшое время действия лазерного импульса успевает прогреться значительная толщина приповерхностного слоя.

В случае низкой температуропроводности материала вся энергия лазерного излучения выделяется в виде тепла только в том слое, где произошло поглощение излучения. Этот слой может успеть расплавиться, испариться и даже ионизироваться, а весь остальной материал останется холодным. Характер поведения материала стенки определяется его коэффициентом температуропроводности χ , имеющим размерность [м²/с].

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИШЕНИ

С помощью этого коэффициента можно определить, за какое время сможет прогреться слой вещества толщиной δ [м]:

$$t_{\text{прогр}} = \delta^2 / \chi$$

Можно решить и обратную задачу: на какую глубину проникает тепло при импульсном нагреве поверхности с длительностью импульса $\tau_{\text{имп}}$:

$$\delta = \sqrt{\chi \cdot \tau_{\text{имп}}}$$

Величина χ определяется плотностью материала ρ [кг/м³], изобарной удельной теплоемкостью c_p [кДж/(кг·К)] и теплопроводностью материала a [кВт/(м·К)]:

$$\chi = a / (c_p \cdot \rho)$$

Значения коэффициента температуропроводности χ и другие теплофизические свойства некоторых материалов, в т.ч. конструкционных, применяемых в ракетной технике, приведены в таблице

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИШЕНИ

Материал				
Алюминий	2.7×10^3	0.92	0.21	8.4×10^{-5}
Титан	4.5×10^3	0.53	0.02	9.3×10^{-6}
Сталь	7.8×10^3	0.50	0.03	1.2×10^{-5}
Углерод	2.5×10^3	0.75	0.34	2.2×10^{-4}
Магний	1.74×10^3	1.00	0.1	-
Медь	8.9×10^3	0.38	0.401	1.11×10^{-4}
Фенол-формальдегидные смолы	1.73×10^3	0.8	1.6×10^{-4}	1.2×10^{-7}
Углепластики	$(1.3 \dots 1.9) \times 10^3$	0.6 ... 1.5	$(0.75 \dots 0.90) \times 10^{-3}$	$(5.0 \dots 8.0) \times 10^{-7}$
Стеклопластик	$(1.6 \dots 2.2)$	0.7 ... 4.2	$(0,21 \dots$	$(0.3 \dots 1.0)$

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИШЕНИ

Если длительность импульса лазерного выстрела удовлетворяет соотношению $\tau_{\text{имп}} \gg t_{\text{прогр}}$, то происходит обычный нагрев и оценить воздействие лазерного излучения можно в рамках классической теории теплопроводности при граничных условиях второго рода.

При оценках порога разрушения лазерным излучением элементов конструкции авиационных и ракетных систем можно ограничиться более простыми соотношениями для тонких пластин.

Так, можно оценить плотность мощности лазерного излучения

I [кВт/м²], необходимую для прогрева пластины толщиной **δ** за время воздействия до ее разрушения:

$$I = [c_p \cdot (T_{\text{пл}} - T_0) + L_{\text{пл}}] \cdot \rho \cdot \delta / \tau$$

где: **T_0 [К]** – начальная температура, **$T_{\text{пл}}$ [К]** – температура плавления, **$L_{\text{пл}}$ [кДж/кг]** – удельная теплота плавления.

Термодинамические характеристики некоторых конструкционных материалов приведены в таблице

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИШЕНИ

Материал				
Алюминий	933	393	2772	1.09×10^4
Титан	1941	315	3560	1.00×10^4
Сталь	1720 ... 1790	205	3135	0.64×10^4
Углерод	-	-	4300	5.92×10^4

Разумное время удержания лазерного пятна на одном месте быстро движущейся цели составляет порядка нескольких секунд (допустим $\tau \sim 2$ с) на небольших дистанциях в несколько километров и тогда можно оценить интенсивность лазерного луча, достаточную для разрушения стенки алюминиевого бака ракеты толщиной ~ 2 мм. Используя табличные данные получим величину $I \approx 2.5$ МВт/м². Важным условием достаточности ущерба является размер пятна. Считается, что для не слишком больших целей неприемлемый ущерб возникнет при размере пятна не менее **0.15 м**. Тогда дошедшее до цели излучение должно иметь мощность около **50 кВт**, а с учетом потерь на отражение от поверхности и ослабления по трассе, мощность лазера должна быть не менее **100 кВт** при времени работы $\tau \sim 2$ с даже для не слишком больших дистанций. Для титана и стали выходная мощность должна быть, как минимум удвоена, а для разрушения элементов конструкций из углеродных материалов еще больше.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИШЕНИ

ЛАЗЕРНАЯ АБЛЯЦИЯ

Импульсные режимы определяются условием $\tau_{\text{имп}} \ll t_{\text{прогрева}}$, при этом характер воздействия на среду становится совсем другим. Известно, что лазерные технологии позволяют получать лазерные импульсы большой пиковой мощности, но небольшой длительности. Поэтому для оценок воздействия импульсных лазеров удобнее пользоваться понятием энергии, а не мощности излучения.

Совокупность сложных физико-химических процессов, быстрого плавления и испарения материала мишени под действием высокоэнергетических коротких лазерных импульсов, сопровождающихся взрывным формированием парогазового (пароплазменного) облака, движущегося нормально к облучаемой поверхности, получила название лазерной абляции.

Построить строгую теоретическую модель, описывающую все многообразие протекающих практически одновременно процессов слишком сложно, да и вряд ли рационально, поскольку необходимо будет варьировать в очень широком диапазоне характеристики лазерного излучения и различные свойства материалов мишеней, что приведет к чрезмерному усложнению вычислений.

Простые оценки плотности энергии лазерного импульса, приходящего на единицу поверхности мишени q_{min} [Дж/м²], необходимой для испарения материала:

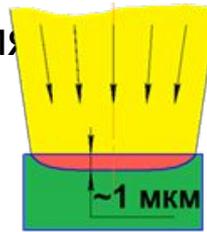
$$q_{\text{min}} \approx \rho \cdot L_{\text{исп}} \cdot \delta \approx \rho \cdot L_{\text{исп}} \cdot \sqrt{\chi \cdot \tau_{\text{имп}}}$$

не являются универсальным решением, поскольку могут быть использованы только при условии, что абляционный режим реализуется.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИШЕНИ

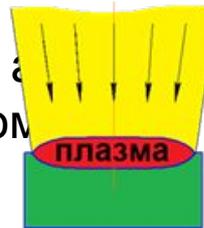
Однако, несмотря на сравнительную простоту выражения, оно вполне правильно определяет основные факторы, определяющие режим лазерной абляции.

Уникальность абляционного режима заключается в том, что лазерный луч только в самом начале процесса взаимодействует с веществом объекта, нагревая и ионизируя его, в результате чего над поверхностью тела появляется тонкий, но плотный плазменный слой. Поэтому низкая температуропроводность материала важна только для начала процесса абляции. Ключевым же фактором достижения абляционного режима является высокая пиковая мощность лазерного импульса.



Лазерное излучение падает на поверхность твёрдого тела и поглощается. Происходит сильный нагрев тонкого слоя < 1 мкм.

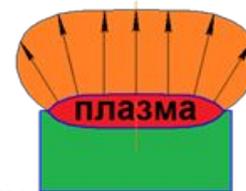
В дальнейшем, большая часть лазерного импульса поглощается не на поверхности, а в сгенерированном лазерным лучом, плотном слое плазмы, обладающей свойством абсолютно чёрного тела поглощать любое падающее на него излучение.



2. $[t \sim 1 \text{ нс}]$

Над поверхностью тела образуется тонкий плотный слой плазмы, которая поглощает большую часть энергии лазерного импульса.

Именно этим объясняется тот факт, что величина пороговых значений мощности и энергии лазерного импульса слабо зависит как от свойств материала, так и от длины волны падающего излучения.



3. $[t \sim 1 \text{ мкс}]$

Слой плазмы адиабатически расширяется. Отток плазмы придаёт телу реактивный импульс.

Значительная база данных, накопленная в ходе экспериментальных исследований позволила оценить пороговое значение мощности лазерного импульса, требуемое для достижения абляционного режима.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИШЕНИ

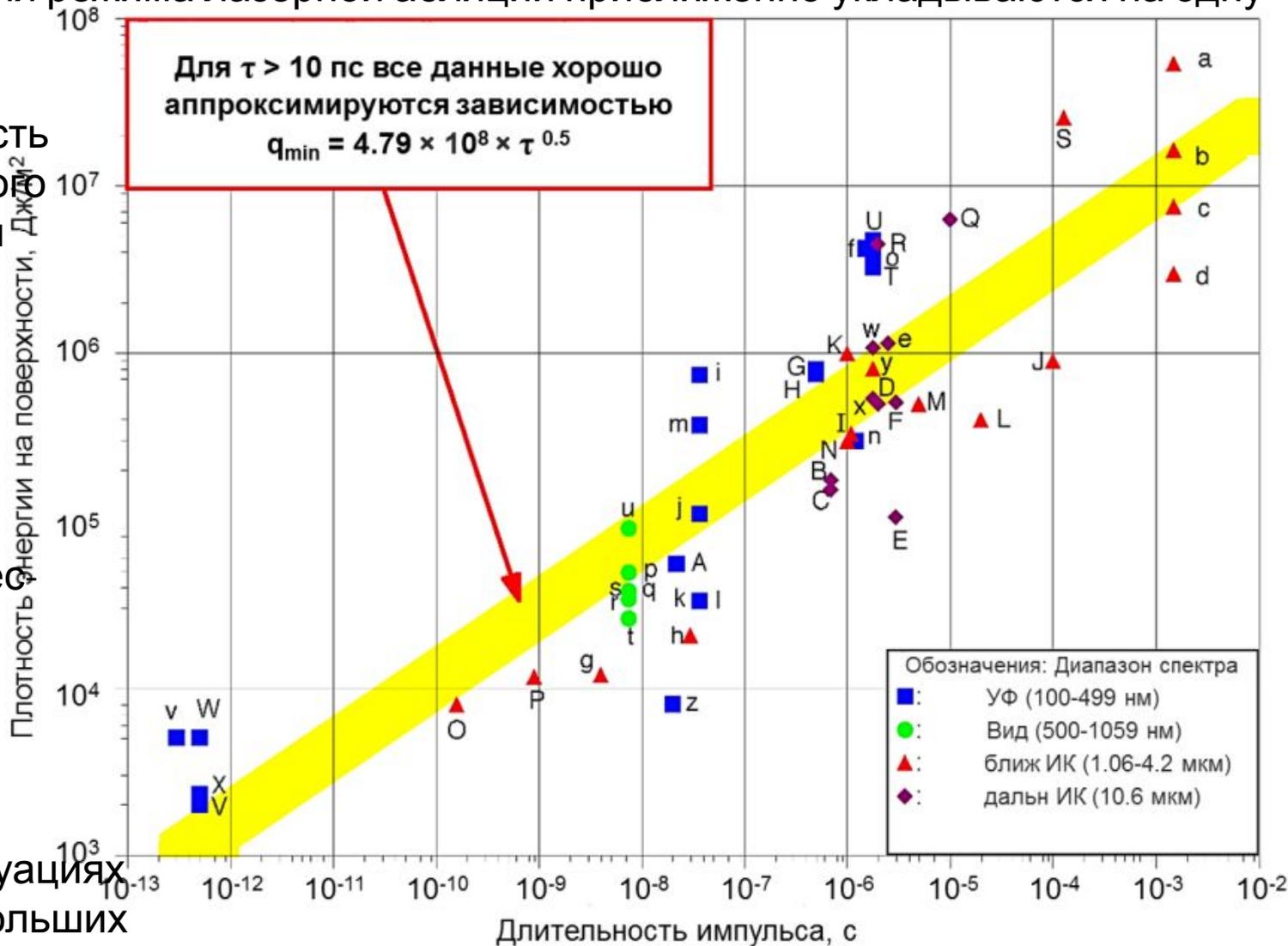
Оказалось, что все экспериментальные данные минимальных значений плотности энергии на цели для режима лазерной абляции приблизительно укладываются на одну полосу.

Аналитически пороговая плотность мощности лазерного излучения на цели оценивается эмпирической формулой.

При этом следует иметь в виду, что использование высокоэнергетических лазерных импульсов в плотных слоях атмосферы

возможно в очень ограниченных ситуациях и требует очень больших апертур. Наиболее

рациональным для мобильных систем кажется их использование в верхних слоях



ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИШЕНИ

Длительность лазерного импульса твердотельного лазера (ТТЛ) в режиме модуляции добротности резонатора составляет порядка $\tau \sim 10^{-8}$ с, чему соответствует $q_{min} \sim 10^5$ Дж/м², обеспечивающей режим абляции.

Масса вещества m , которая может быть испарена лазерным импульсом с энергией $E_{имп} \approx q \cdot S$, определяется балансовым уравнением:

$$m \approx E_{имп} / [c_p \cdot (T_{кип} - T_0) + L_{исп}] \approx E_{имп} / L_{исп}$$

где S [м²] – площадь облученной поверхности, T_0 [К] – начальная температура, $T_{кип}$ [К] – температура кипения, $L_{исп}$ [кДж/кг] – удельная теплота испарения. Отсюда следует, что отнесенная к энергии лазерного импульса величина испаренной массы постоянна для каждого материала мишени:

$$\frac{m}{E_{имп}} \approx [c_p \cdot (T_{кип} - T_0) + L_{исп}]^{-1}$$

Для алюминия эта величина составляет $\sim 80 \times 10^{-9}$ (кг/Дж), что совпадает с известными экспериментальными данными.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИШЕНИ

Разумный размер зоны воздействия на поверхности цели составляет ~ 0.15 м. Большие размеры пятна могут превышать размер потенциальных объектов воздействия, тогда как зона поражения меньшего размера, может не привести к желаемому эффекту воздействия. Для того, чтобы испарить элемент алюминиевой пластины диаметром **0.15** м и толщиной ~ 2 мм потребуется лазерной импульс энергией

$$E_{\text{имп}} \approx \rho \cdot \delta \cdot S \cdot L_{\text{исп}} \approx 1.3 \text{ МДж.}$$

Значение $q \sim 10^7$ Дж/м² в этом случае заведомо соответствует режиму абляции. Кстати в данном случае вместо одного мегаджоульного импульса можно использовать пачку из сотни импульсов ~ 10 кДж энергии каждый, что существенно проще с технической точки зрения. При этом условие достижения режима абляции ($q_{\text{min}} \geq 10^5$ Дж/м²) останется в силе.

Воздействие ультракоротким импульсом на движущуюся цель имеет важное преимущество из-за отсутствия проблем с удержанием луча на цели, поскольку даже при скоростях в километры в секунду, за $\tau \sim 10^{-8}$ с пятно на поверхности мишени сместится не более чем на несколько сантиметров.

Условие полного испарения материала в зоне воздействия не всегда рационально с энергетической точки зрения, поскольку требует более чем на порядок больше затрат энергии на поражение и чрезмерно с практической точки зрения, поскольку разрушение элемента конструкции может произойти гораздо раньше.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИШЕНИ

Здесь стоит обратить внимание на то, что формирование парогазового (пароплазменного) облака при расширении продуктов испарения материала в режиме лазерной абляции носит взрывной характер и может вызывать реактивный импульс, прилагаемый нормально к площади воздействия лазерного луча. Воздействие такого реактивного импульса на поверхность цели может ее разрушить, а кроме того, приложение реактивной силы к движущемуся объекту ограниченной массы может привести к неприемлемому изменению его траектории и, следовательно, решению задачи противодействия. Такие решения активно обсуждаются при рассмотрении идей «лазерных реактивных двигателей» и очистки околоземного пространства от «космического мусора».

Оценить силовое воздействие на мишень можно, положив, что температура оттекающей плазменной струи должна быть не меньше $T_{кип}$ материала цели, а приобретаемая продуктами испарения скорость оттока равна скорости звука в газе:

$$v = \frac{E_{имп}}{L_{исп}} \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{\mu}}$$

где $\gamma = c_p/c_v$ – показатель адиабаты (для одноатомного газа $\gamma = 1.67$), R – универсальная газовая постоянная, T – температура, μ – молекулярная масса.

При обсуждаемых выше условиях воздействия лазерного импульса на алюминиевую поверхность ($T_{кип} = 2772$ К, $\mu = 27$) скорость звука составит $v \approx 1200$ м/с.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИШЕНИ

Тогда из условия сохранения количества движения, можно определить скорость V , приобретаемую мишенью в направлении лазерного импульса в результате абляции:

$$V = \frac{m \cdot v}{M} \approx \frac{E_{\text{имп}}}{M \cdot L_{\text{исп}}} \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{\mu}}$$

где M - масса мишени

Выделяя C_m [н·с/Дж], как зависящую только от параметров материала мишени:

$$C_m \approx \frac{\sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{\mu}}}{L_{\text{исп}}}$$

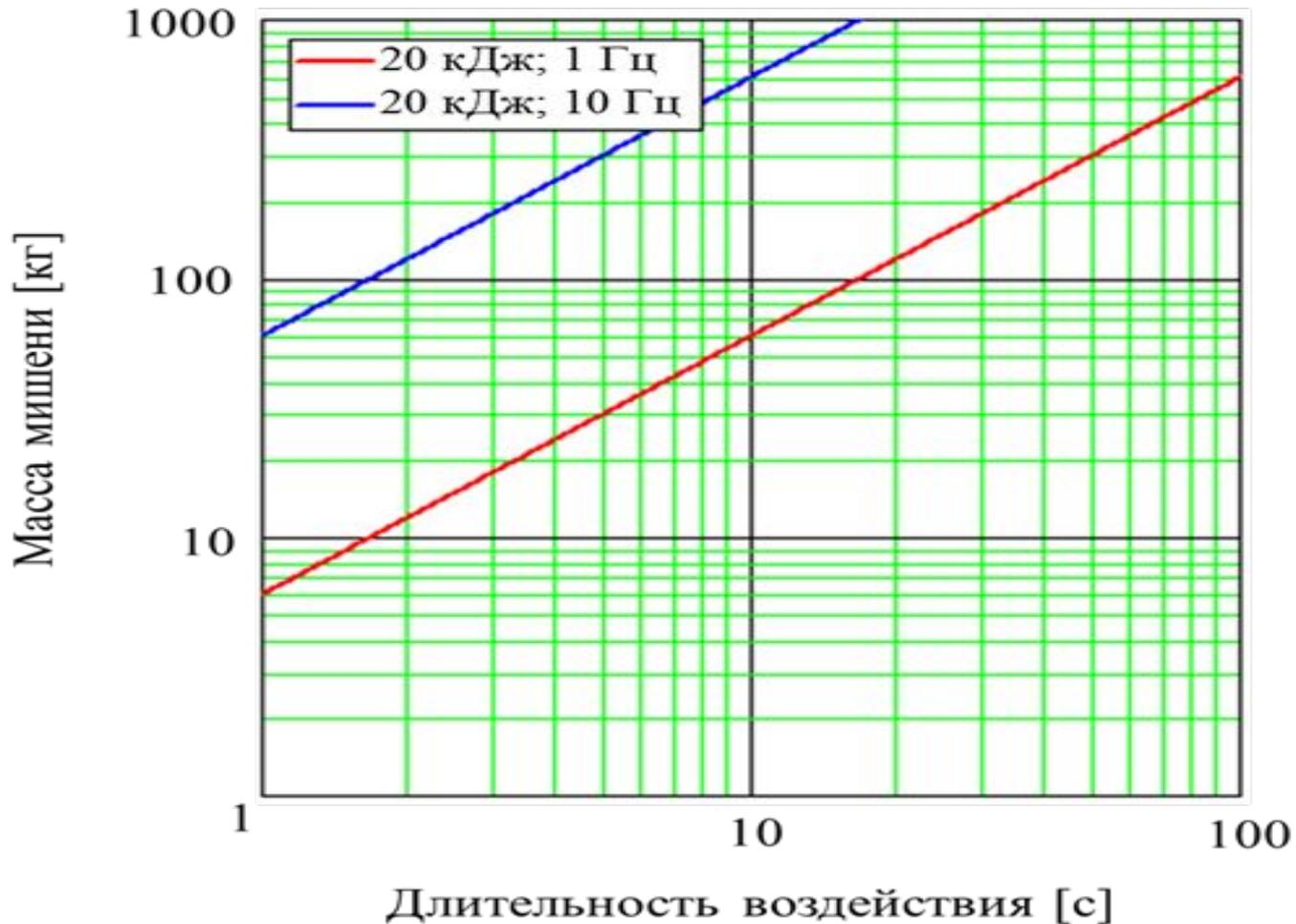
Тогда приращение скорости мишени от воздействия лазерного импульса можно оценивать по формуле:

$$V \approx C_m \cdot \frac{E_{\text{имп}}}{M}$$

Полученная отсюда величина $C_m \approx 10^{-4}$ [н·с/Дж] для алюминия хорошо совпадает с результатами экспериментальных исследований, согласно которым для широкого круга материалов и различных значений энергии импульса C_m имеет значения в диапазоне 10^{-5} - 10^{-4} [н·с/Дж].

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИШЕНИ

На рисунке приведены результаты расчета необходимого времени воздействия лазерными импульсами с энергией **20 кДж** и частотой **1** и **10 Гц** для изменения скорости объекта (мишени) на **0.2 м/с**. При этом предполагается, что размер мишени больше размера пятна падающего лазерного излучения.



ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИШЕНИ

Выводы

- ❑ Для процесса поглощения важны длительность лазерного импульса и температуропроводность материала:
- ❑ если температуропроводность материала велика, то даже за небольшое время действия лазерного импульса успевает прогреться значительная толщина приповерхностного слоя;
- ❑ при низкой температуропроводности материала вся энергия лазерного излучения выделяется в виде тепла только в том слое, где произошло поглощение излучения.
- ❑ Лазерной абляцией называется совокупность сложных физико-химических процессов, быстрого плавления и испарения материала мишени под действием высокоэнергетических коротких лазерных импульсов с формированием парогазового (пароплазменного) облака, движущегося нормально к облучаемой поверхности.
- ❑ Уникальность абляционного режима заключается в том, что величина пороговых значений мощности и энергии лазерного импульса слабо зависит от свойств материала и от длины волны падающего излучения поскольку большая часть лазерного импульса поглощается сгенерированным им самим, плотным слоем плазмы, обладающей свойством абсолютно чёрного тела поглощать любое падающее на него излучение.