

Л.Г. Астафьева, А.П. Пришивалко, Л.П. Семенов, С.Т. Лейко

ВЛИЯНИЕ ВАРИАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОПТИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ЛЕДЯНЫХ ЧАСТИЦ НА ИХ ТЕПЛОВОЕ РАЗРУШЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ С $\lambda = 10,6$ мкм

Приведены результаты систематического исследования влияния начальной температуры и оптических постоянных льда на тепловое разрушение сферических ледяных частиц под действием излучения с длиной волны 10,6 мкм при условии, что интенсивность воздействующего излучения достаточно высока, чтобы градиенты температуры, приводящие к возникновению разрушающих напряжений внутри частицы, возникали раньше, чем в какой-либо точке или совокупности точек внутри частицы будет достигнута температура плавления льда.

В пластинчатых ледяных кристаллах под действием интенсивного излучения с длиной волны 10,6 мкм возникают неоднородные температурные поля, которые способствуют появлению полей упругих напряжений [1]. При высокой неоднородности температурного поля растягивающие упругие напряжения, вызванные большими перепадами температур, могут стать выше, чем критическая для льда величина напряжения на разрыв ($\sim 2 \cdot 10^6$ н/м²). В этом случае ледяной кристалл разрушается с образованием более мелких ледяных частиц.

Сферические ледяные частицы, как и пластинчатые кристаллы, могут разрушаться при воздействии интенсивного излучения с $\lambda = 10,6$ мкм из-за неоднородного внутреннего тепловыделения, не достигая при этом температуры плавления льда. Условные и энергетические затраты теплового разрушения сферических частиц льда под действием интенсивного излучения с длиной волны 10,6 мкм подробно рассмотрены в [2]. В настоящей работе исследовано влияние начальной температуры T_0 и оптических постоянных ледяных частиц на условия их теплового разрушения при лучевом нагреве.

Начальная температура частиц льда может существенно изменяться в зависимости от метеорологических условий. Что касается оптических постоянных льда, то, во-первых, комплексные показатели преломления льда, заимствованные из различных источников, несколько отличаются, что зависит, по-видимому, от чистоты льда и условий экспериментов. Кроме того, имеющиеся в литературе немногочисленные данные по оптическим постоянным льда [3, 4, 5] приведены для разных температур. Однако эти данные не дают возможности получить температурную зависимость оптических постоянных льда в интересующем нас интервале температур. Необходимо также иметь в виду, что ледяные частицы, образующиеся в атмосфере, часто содержат микропримеси, которые могут изменять их оптические свойства. С целью выяснения общих тенденций показатель преломления n варьировался в интервале $1,05 \leq n \leq 1,35$, показатель поглощения — $0,05 \leq \kappa \leq 0,35$, начальная температура частиц льда — $210^\circ\text{K} \leq T_0 \leq 250^\circ\text{K}$.

Задача о разрушении взвешенной в воздухе ледяной сферы под действием термоупругих напряжений, инициированных интенсивным лазерным излучением, поставлена и решена в [2]. Там же найден и критерий перегрева ($\Delta T = 10^\circ\text{K}$), приводящего к растрескиванию ледяного шара с R , равным $5 \div 50$ мкм.

По схеме, изложенной в [2], выполнены расчеты времени от начала облучения до растрескивания t_p и количества поглощенной при этом энергии $E_{\text{погл}}$ в зависимости от начальной температуры и оптических постоянных для частиц различных размеров. Определены пороговые значения интенсивности излучения, при которых достигается растрескивание, для различных значений начальной температуры T_0 , оптических постоянных n и κ и размеров частиц R , прежде чем в какой-то области кристалла начнется фазовый переход.

Сопоставление времени от момента начала облучения до растрескивания частиц t_p при $T_0 = 210^\circ\text{K}$ с t_p при других начальных температурах показано на рис. 1. На рисунке приведено отношение $\alpha = t_p(T_0)/t_p(T_0 = 210^\circ\text{K})$. Видно, что при интенсивностях воздействующего излучения $I \lesssim 5 \cdot 10^8$ Вт/м² для $R = 50$ мкм время растрескивания уменьшается не более чем на 30% при увеличении начальной температуры в интервале от 210°K до 250°K . Вблизи пороговых значений интенсивности воздействующего излучения время от момента включения облучения до растрескивания частиц при увеличении T_0 резко падает. При начальной температуре $T_0 = 250^\circ\text{K}$ t_p уменьшается для $R = 50$ мкм на 80% по сравнению со случаем, когда $T_0 = 210^\circ\text{K}$.

Заметим, что если для $R = 50$ мкм на рис. 1 в числе прочих приведены также графики для пороговой интенсивности воздействующего излучения $I_{\text{пор}} = 3 \cdot 10^8$ Вт/м², то для частиц меньшего размера (например, $R = 10$ мкм) такие графики привести невозможно, так как в этом случае само пороговое значение интенсивности зависит от начальной температуры.

На рис. 2 видно, что для ледяных частиц с $R \geq 20$ мкм $I_{\text{пор}}$ не зависит от начальной температуры T_0 в интервале $210^\circ\text{K} \leq T_0 \leq 250^\circ\text{K}$. С уменьшением радиуса частиц интервал значений начальных температур, при которых пороговое значение интенсивности остается постоянным, сужается, а область начальных температур, где $I_{\text{пор}}$ возрастает с увеличением T_0 , расширяется. Например, при $R = 10$ мкм $I_{\text{пор}}$ равно $4,64 \cdot 10^9$ Вт/м² и остается постоянным только в области $210 \leq T_0 \leq 220^\circ\text{K}$, при увеличении T_0 до 250 К пороговое значение интенсивности возрастает не менее чем на 10%. В случае малых ледяных частиц ($R = 5$ мкм) во всем рассмотренном интервале начальных температур $210 \text{ K} \leq T_0 \leq 250^\circ\text{K}$ $I_{\text{пор}}$ существенно возрастает с увеличением T_0 (более чем в 5 раз).

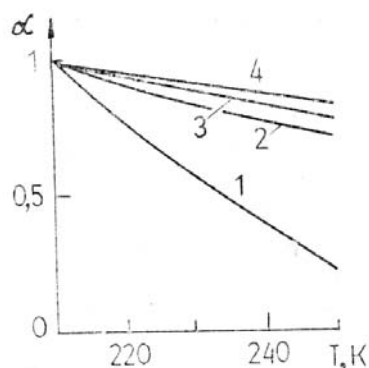


Рис. 1. Зависимости отношений α от начальной температуры при различных интенсивностях воздействующего излучения: 1— $3 \cdot 10^8$, 2— $5 \cdot 10^8$, 3— 10^9 , 4— 10^{10} Вт/м² для частиц с $R = 50$ мкм

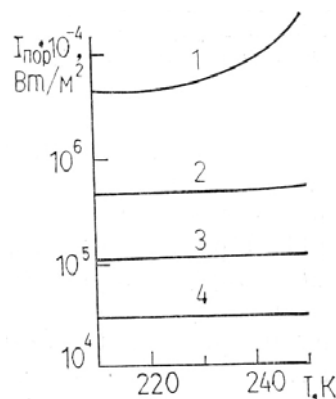


Рис. 2. Зависимости пороговой интенсивности от начальной температуры для частиц разных размеров: 1—5, 2—10, 3—20, 4—50 мкм

Такой тип зависимости $I_{\text{пор}}(T_0)$ при различных размерах частиц связан с различным характером распределения функции источников тепла внутри этих частиц. Максимальная температура, достигаемая внутри частиц при воздействии на них излучением с пороговой интенсивностью, тем выше, чем меньше размер частиц. Поэтому в случае больших ледяных частиц при увеличении начальной температуры указанный выше критерий растрескивания ($\Delta T \geq 10^\circ\text{K}$) выполняется раньше, чем частица нагревается до температуры плавления. В результате пороговая интенсивность воздействующего излучения остается неизменной. В малых ледяных сферах критерий растрескивания при нагреве еще не выполняется, а в некотором объеме частицы уже достигается температура плавления и только при существенном увеличении интенсивности критерий растрескивания достигается раньше, чем температура плавления. Пороговая интенсивность разрушения частиц повышается.

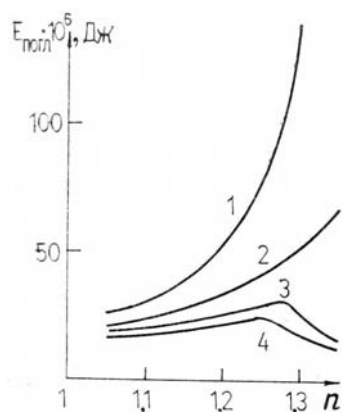


Рис. 3. Зависимости энергии, поглощенной за время от начала облучения до растрескивания частиц с $R = 10$ мкм, от показателя преломления при $\kappa = 0,134$ и различных значениях интенсивности воздействующего излучения: 1— 10^{10} , 2— $2 \cdot 10^{10}$, 3— $5 \cdot 10^{10}$, 4— 10^{11} Вт/м²

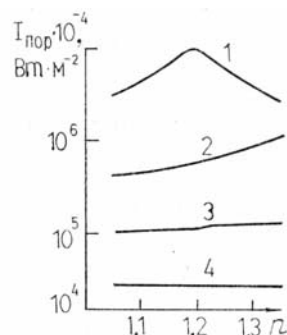


Рис. 4. Зависимости пороговой интенсивности от показателя преломления n при $\kappa = 0,134$ для частиц различных размеров: 1—5, 2—10, 3—20, 4—50 мкм

Как видно из хода кривых рис. 3, при высоких значениях интенсивности излучения $I \geq 5 \cdot 10^{10}$ Вт/м² поглощенная энергия для $R = 10$ мкм сначала возрастает при увеличении n . При определенном значении показателя преломления, зависящем от величины интенсивности воздейст-

вующего излучения, $E_{\text{погл}}$ достигает максимума, затем падает. При $I=10^{11}$ Вт/м² поглощенная энергия максимальна при $n = 1,25$, а при $I = 5 \cdot 10^{10}$ Вт/м² $E_{\text{погл}}$ имеет максимальное значение при $n = 1,28$. При $I \leq 2 \cdot 10^{10}$ Вт/м² поглощенная энергия увеличивается во всем интервале изменения n от 1,05 до 1,35. Этот рост тем значительнее, чем меньше I . При увеличении показателя преломления от 1,05 до 1,3 величина $E_{\text{погл}}$ возрастает примерно в 2,5 раза в случае $I = 2 \cdot 10^{10}$ Вт/м² и более чем в 5 раз при $I = 10^{10}$ Вт/м².

Зависимость $E_{\text{погл}}$ от показателя поглощения имеет примерно одинаковый характер для всех рассмотренных интенсивностей воздействующего излучения. Чем меньше интенсивность воздействующего излучения, тем больше количество поглощенной до растрескивания энергии при одном и том же значении κ . Например, при $\kappa = 0,1$ величина $E_{\text{погл}}$ уменьшается более чем в 2 раза при увеличении I от 10^{10} до 10^{11} Вт/м².

Отмеченные зависимости поглощенной энергии от показателя преломления (рис. 3) могут быть объяснены, исходя из распределения источников тепла и температуры внутри частицы при различных значениях показателя преломления и интенсивности воздействующего излучения. Выделение тепла в объеме частицы с $R = 10$ мкм существенно неоднородно. Максимум тепловыделения наблюдается при $n < 1,2$ в освещенной полусфере на поверхности частицы. При $n > 1,2$ максимум тепловыделения перемещается на теневую поверхность частицы. Минимум тепловыделения локализуется при всех значениях n в теневой полусфере. Следует отметить, что при увеличении показателя преломления от $n = 1,05$ до 1,35 тепловыделение практически не изменяется в той области освещенной полусферы, которая примыкает к поверхности частицы. В остальной освещенной части и в теневой полусфере плотность электрической энергии плавно возрастает.

При высоких интенсивностях излучения, когда теплопроводность не успевает сгладить неоднородность нагрева, зависимость распределения температуры от показателя преломления практически воспроизводит распределение тепловыделения. Ход зависимости поглощенной энергии от показателя преломления при высоких I можно объяснить следующим образом. Поскольку при $n < 1,2$ максимум тепловыделения находящейся в освещенной полусфере частицы изменяется незначительно, а минимальное значение в теневой полусфере частицы возрастает, то для достижения критерия растрескивания время от начала облучения до растрескивания должно увеличиваться. Следовательно, поглощенная энергия тоже растет. При $n > 1,2$ максимум и минимум тепловыделения находятся в теневой полусфере частицы. Причем с увеличением показателя преломления максимальное и минимальное значения плотности энергии возрастают, но максимум тепловыделения увеличивается быстрее, чем минимум. При этом критерий растрескивания достигается за меньшее время, уменьшается и поглощенная энергия.

При уменьшении интенсивности воздействующего излучения существенную роль играет теплопроводность. В этом случае при увеличении n температура возрастает и в освещенной полусфере частицы, где находится максимальное значение температуры, и в теневой полусфере, где наблюдается минимум температуры. В связи с таким характером распределения температурного поля внутри частицы при увеличении показателя преломления поглощенная до растрескивания энергия возрастает.

Количество энергии, поглощенной частицей от начала облучения до растрескивания, с изменением показателя поглощения κ также зависит от температурных полей, образующихся при нагреве частицы излучением с различными интенсивностями. Распределение температурных полей внутри частицы с радиусом $R = 10$ мкм для различных значений показателя поглощения при воздействии различными интенсивностями отличается только количественно, качественно характер распределения температуры одинаков. Максимум температуры находится в освещенной полусфере на поверхности частицы, минимум температуры — в теневой полусфере на поверхности либо сдвинут к центру частицы. При увеличении κ температура внутри частицы уменьшается, тем больше, чем выше интенсивность излучения. Отсюда следует, что при увеличении показателя поглощения энергия, поглощенная частицей от начала облучения до растрескивания, должна уменьшаться при одной и той же интенсивности воздействующего излучения. При увеличении же I поглощенная энергия должна убывать при одном и том же значении κ .

Исследования показали, что при вариациях оптических постоянных частиц существенно изменяются и пороговые значения интенсивности, при которых достигается их растрескивание (рис. 4). Как видно из рис. 4, характер зависимости различен для частиц различных размеров. Пороговая интенсивность практически не зависит от показателя преломления для больших частиц ($R \geq 30$ мкм). Для частиц меньших размеров $I_{\text{пор}}$ возрастает при увеличении n . Причем чем меньше радиус частиц, тем сильнее рост пороговой интенсивности. При $R = 20$ мкм увеличение $I_{\text{пор}}$ составляет 20% при возрастании n от 1,05 до 1,35. В случае $R = 10$ мкм пороговая интенсивность в том же интервале n увеличивается более чем в 2 раза. Для малых частиц ($R = 5$ мкм) пороговая интенсивность вначале возрастает почти в 3,5 раза при увеличении n от 1,05 до 1,2. Дальнейший рост показателя преломления до значения $n = 1,35$ сопровождается уменьшением $I_{\text{пор}}$ во столько же раз.

При увеличении показателя поглощения κ пороговые интенсивности быстро снижаются при всех радиусах частиц. Чем меньше радиус частицы, тем быстрее уменьшается $I_{\text{пор}}$ при увеличении показателя поглощения. Для $R = 5$ мкм при увеличении κ от 0,05 до 0,35 пороговая интенсивность снижается почти в 40 раз, для $R = 10$ мкм — в 20 раз, для $R = 50$ мкм — в 2 раза.

Такие зависимости пороговой интенсивности от оптических постоянных вещества частицы легко можно объяснить распределением полей температур внутри частицы при малых интенсивностях воздействующего излучения. В этих случаях, как уже указывалось выше для $R \geq 10$ мкм, температура внутри частицы тем выше, чем больше показатель преломления n и чем меньше показатель поглощения k . Для случая малых частиц ($R = 5$ мкм) температура внутри частицы возрастает при увеличении n от 1,05 до 1,2, дальнейший рост n до значения 1,35 приводит к уменьшению температуры.

Если внутри частицы наблюдаются высокие значения температуры, близкие к температуре плавления, то даже незначительное уменьшение интенсивности воздействующего излучения может привести к достижению температуры плавления, а критерий растрескивания $\Delta T \approx 10^\circ\text{K}$ не будет выполнен. Поэтому пороговое значение интенсивности будет выше в случае более высоких уровней температур и ниже для более низкого температурного поля внутри частиц.

1. Свиркунов П. Н., Семенов Л. П. — В кн.: Атмосферная оптика. Тр. Института эксперим. метеорологии. — М.: Гидрометеиздат, 1975, вып. 11(54), с. 3.
2. Пришивалко А. П., Семенов Л. П., Астафьева Л. Г., Лейко С. Т. Исследование теплового разрушения сферических ледяных частиц под действием излучения с длиной волны 10,6 мкм. — Минск, 1986, 40 с. (Препринт Ин-т физики АН БССР).
3. Schaff J. W., Williams D. — J. Opt. Soc. Amer., 1973, v. 63, p. 726.
4. Irvine W. M., Pollack J. V. Icarus, 1968, № 8, p. 324.
5. Золотарев В. М., Морозов В. Н., Смирнова Е. В. Оптические постоянные природных и технических сред. — Л.: Химия, 1984. — 216 с.

Институт физики
Академии наук БССР,
Минск

Поступила в редакцию
28 октября 1987 г.

L. G. Astafieva, A. P. Prishivalko, L. P. Semenov, S. T. Leiko. **Effect of the Temperature and the Optical Constants of Ice Spherical Particles on their Thermal Destruction by Radiation with $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$.**

Systematic study on the effect of the ice initial temperature and optical constants on the thermal destruction of the ice spherical particles subject to laser radiation at 10 μm is reported. The incident intensity is sufficiently high for the temperature gradients resulting in the particle destruction to arise before the ice melting temperature is reached at any point within the particle.