

# On Uncertainty of Modeling the Interaction of a Meteoroid with the Atmosphere at Various Entry Angles

I. G. Brykina, L. A. Egorova

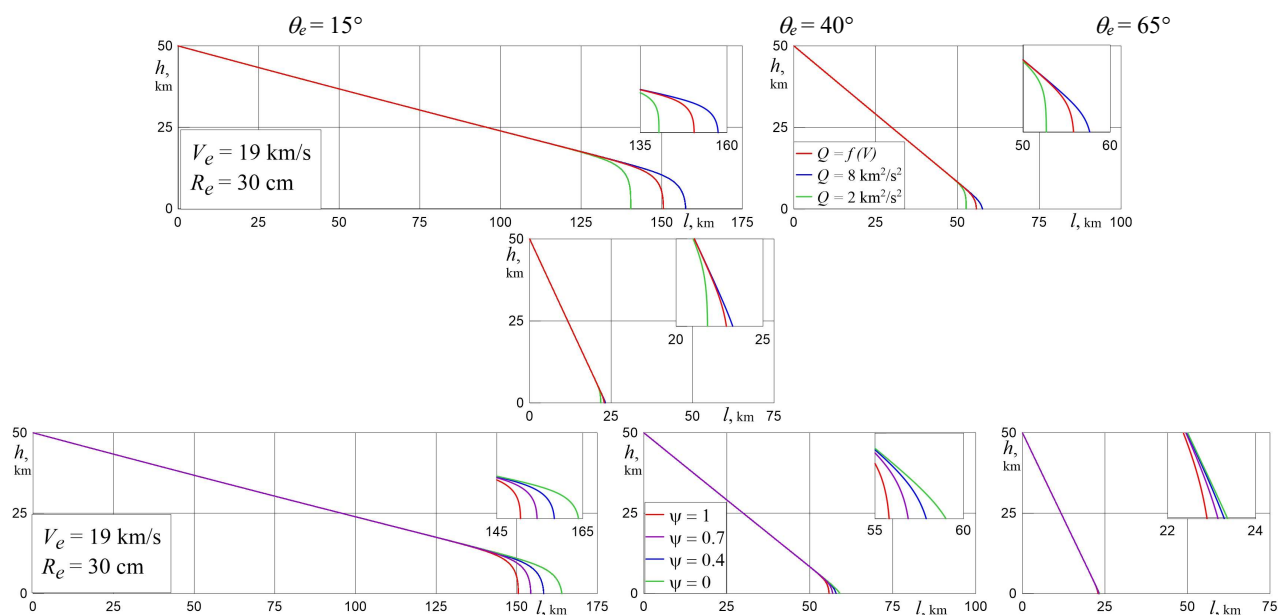
*Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University,  
Moscow, 119192, Russia*

shantii@mail.ru

## Abstract

The interaction with the atmosphere of the meteor body or its fragments (after destruction) is modeled by numerically solving the meteor physics equations, taking into account the curvilinearity of the trajectory. The uncertainty of such modeling is due to the uncertainty in setting the main governing parameters of the equations: the heat transfer coefficient and effective heat of ablation. We study how the angle of meteoroid entry into the atmosphere influences on the scatter in the results of calculations of its velocity, mass loss, energy deposition, trajectory and meteorite fall location, caused by different ways of setting the heat transfer coefficient and ablation heat.

Keywords: meteoroid, interaction with the atmosphere, heat transfer coefficient, ablation heat.



Effect of the meteoroid entry angle  $\theta_e$  on the trajectory  $h(l)$  at various ways of setting the ablation heat  $Q$  (upper graphs) and uncertainty parameter  $\psi$  in the heat transfer coefficient (lower graphs).  $V_e$  and  $R_e$  are the meteoroid entry velocity and radius,  $h$  is the flight altitude,  $l$  is the distance along the Earth surface

УДК 533.6:523.6

# О неопределенности моделирования взаимодействия метеорного тела с атмосферой при разных углах входа

И. Г. Брыкина, Л. А. Егорова

*НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова,  
Россия, Москва, 119192, Мичуринский пр., 1  
shantii@mail.ru*

## Аннотация

Взаимодействие с атмосферой метеорного тела или его фрагментов (после разрушения), моделируется путем численного решения уравнений метеорной физики с учетом криволинейности траектории. Неопределенность такого моделирования связана с неопределенностью задания основных определяющих параметров этих уравнений – коэффициента теплопередачи и эффективной теплоты абляции. Исследуется, как влияет угол входа метеорного тела в атмосферу на разброс результатов расчетов его скорости, потери массы, энерговыделения, траектории и мест падения метеоритов, связанный с разными способами задания коэффициента теплопередачи и теплоты абляции.

Ключевые слова: метеороид, взаимодействие с атмосферой, коэффициент теплопередачи, теплота абляции.

## 1. Введение

Одним из основных процессов взаимодействия метеорных тел с атмосферой, наряду с их разрушением из-за больших аэродинамических нагрузок, является абляция. В результате сильного нагрева, для крупных тел в основном радиационного, входящие в атмосферу метеороиды и астероиды теряют большую часть своей массы. Основную сложность при моделировании абляции и движения метеорных тел представляет недостаточность данных по радиационному тепловому потоку и теплоте абляции в диапазоне параметров, характерном для их полета. Скорость входа небесных объектов в атмосферу значительно превышает скорость космических аппаратов, поэтому результаты численного моделирования и экспериментального (полетного и наземного) исследования тепловых потоков и теплоты абляции, полученные для космических аппаратов, большей частью не применимы для условий полета таких объектов.

Взаимодействие с атмосферой влетевшего в нее метеорного тела (и его фрагментов после разрушения) обычно моделируется в рамках уравнений метеорной физики, которые описывают его движение вдоль траектории, саму траекторию, абляцию и энерговыделение [1]. Основные определяющие параметры этих уравнений – это коэффициент теплопередачи  $C_H$  и эффективная теплота абляции  $Q$ . Для решения уравнений метеорной физики надо не только знать эти параметры, но и представить их в виде аналитической зависимости от скорости и размера тела и от плотности атмосферы. В диапазоне параметров, характерных для космических аппаратов, при скоростях менее 12 км/с, для радиационного теплового потока были предложены такие аппроксимационные зависимости, обзор которых приведен в [2, 3]. В более широком диапазоне параметров, для больших скоростей, подобная зависимость была получено в работе авторов [4]. Однако в этом корреляционном соотношении остается неко-

торая неопределенность, связанная с рядом факторов, в частности с тем, что немногие численные методы расчета радиационной теплопередачи для параметров обтекания, характерных для входа в атмосферу крупных небесных тел, во-первых, не учитывают ряд физических явлений и, во-вторых, дают разные результаты, в частности, из-за того, что используют разные модели излучения и поля течения в ударном слое. Обзор методов расчета радиационного теплового потока в метеорном диапазоне параметров, развитых в последние годы в связи с актуализацией проблемы астероидно-кометной опасности, приведен в [4, 5]. В литературе при решении уравнений метеорной физики коэффициент теплопередачи обычно полагается постоянным.

Теплота абляции также считается постоянной и обычно полагается равной теплоте испарения обыкновенных хондритов и железных метеоритов. Однако механизм уноса массы по мере торможения метеороида меняется, приближаясь при небольших скоростях к уносу массы только за счет плавления и сдувания жидкой пленки, а также за счет механической эрозии (шелушения), что требует меньших затрат энергии. Обзор теоретических и экспериментальных работ по изучению абляции метеорных тел приведен в [6]. Результаты исследований, проведенных как для земных материалов, так и для образцов метеоритов, показывают [7], что механизм уноса массы, и, соответственно, теплота абляции, сильно зависит от скорости, поэтому в работе [6] авторы провели интерполяцию эффективной теплоты абляции между теплотой испарения и теплотой плавления (эрозии).

В данной работе исследуется влияние угла входа метеорного тела в атмосферу на неопределенность моделирования его траектории, уноса массы, скорости, энергосыделения и места падения метеорита, вызванную неопределенностью задания коэффициента теплопередачи и эффективной теплоты абляции. При численном решении уравнений метеорной физики эти параметры задавались разными способами с использованием выведенных для них аппроксимационных соотношений. Работа является продолжением исследований авторов [5, 6, 8] по оценке влияния неточности задания коэффициента теплопередачи  $C_H$  [5, 8] и эффективной теплоты абляции  $Q$  [6, 8] на моделируемые характеристики взаимодействия метеороида с атмосферой, проводившихся только при одном угле входа в атмосферу, равном  $18^\circ$  (угол входа Челябинского астероида [9]).

## 2. Постановка задачи

Взаимодействие с атмосферой входящего в нее метеороида или его фрагментов (после разрушения) моделируется в рамках обобщенных уравнений метеорной физики [10], в которых, в отличие от простой физической теории метеоров [1, 11], учитываются сила тяжести и искривление траектории. Уравнения, описывающие движение метеорного тела вдоль траектории, саму траекторию, потерю его массы и энергосыделение, а также изменение плотности воздуха в изотермической атмосфере, имеют вид

$$\begin{aligned}
 M \frac{dV}{dt} &= -\frac{\pi}{2} R_S^2 C_D \rho V^2 + Mg \sin \theta, \\
 \frac{dh}{dt} &= -V \sin \theta, \quad \frac{d\theta}{dt} = \frac{g \cos \theta}{V} - \frac{V \cos \theta}{R_\infty + h}, \\
 \frac{dM}{dt} &= -\frac{\pi C_H}{2 Q} R_S^2 \rho V^3, \\
 \frac{dE}{dt} &= -\frac{1}{V \sin \theta} \frac{d}{dt} \left( \frac{MV^2}{2} \right) = -\frac{1}{V \sin \theta} \left( \frac{V^2}{2} \frac{dM}{dt} + MV \frac{dV}{dt} \right), \\
 \rho &= \rho_0 \exp \left( -\frac{h}{h^*} \right)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь  $t$  – время;  $V, M$  и  $R_S$  – скорость, масса и радиус миделева сечения метеороида;  $\theta$  – угол наклона траектории по отношению к горизонту (к касательной к поверхности Земли);  $h$  – высота полета;  $C_D$  – коэффициент лобового сопротивления;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $R_\oplus$  – радиус Земли;  $\rho$  – плотность атмосферы;  $\rho_0 = 1.29 \text{ кг/м}^3$ ;  $h^* = 7 \text{ км}$ ;  $C_H$  – коэффициент теплопередачи на единицу площади миделева сечения;  $Q$  – эффективная теплота абляции;  $dE/dh$  – кинетическая энергия  $E$ , выделяемая на единицу высоты. Энерговыведение вдоль траектории является важной характеристикой взаимодействия метеорного тела с атмосферой: часть выделившейся энергии идет на излучение и может регистрироваться наземными и спутниковыми системами наблюдения. По регистрируемому вдоль траектории свечению (световым кривым) с помощью полуэмпирических методик можно определить выделившуюся энергию.

Уравнения (1) записаны в предположении, что метеороид имеет сферическую форму (шар). В этом случае масса метеороида  $M$  связана с его радиусом миделя  $R_S$  соотношением

$$M = \frac{4\pi\delta}{3} R_S^3 \quad (2)$$

Здесь  $\delta$  – плотность метеороида. При задании распределения давления по поверхности сферы по формуле Ньютона коэффициент лобового сопротивления  $C_D = 1$ .

Коэффициент теплопередачи  $C_H$  и теплота абляции  $Q$  являются основными определяющими параметрами уравнений (1), (2). При высоких скоростях, характерных для метеорных тел, радиационный тепловой поток значительно превосходит конвективный на большей части траектории в континуальном режиме обтекания, где и происходит основной унос массы крупных метеороидов. Конвективный тепловой поток играет основную роль для мелких фрагментов на заключительной части траектории, когда они существенно затормозились, поэтому он также учитывается. Для коэффициента теплопередачи  $C_H$  будем использовать соотношение, вывод которого изложен в [5], учитывающее его зависимость от скорости метеороида  $V$ , радиуса затупления  $R$  и плотности атмосферы  $\rho$

$$C_H(V, R, \rho) = \psi(C_{Hr} + C_{Hc}), \quad (3)$$

где  $C_{Hr}(V, R, \rho)$  и  $C_{Hc}(V, R, \rho)$  – коэффициенты радиационной и конвективной теплопередачи. Для коэффициента радиационной теплопередачи  $C_{Hr}$  в [4] было получено аппроксимационное выражение в зависимости от параметров  $V, R, \rho$ , модифицированное в [5] для расширения диапазона его применимости на меньшие скорости и высоты. В данной работе  $C_{Hr}$  вычислялся по формулам работы [5]. Аппроксимационное выражение для коэффициента конвективной теплопередачи в зависимости от  $V, R, \rho$  также приведено в [5].

В выражение (3) для  $C_H$  введен параметр неопределенности  $\psi$  для того, чтобы учесть существующую неточность теплового потока к телу и оценить ее влияние на результаты моделирования массы, скорости, энерговыведения и траектории метеороида путем варьирования  $\psi$ . Неточность коэффициента теплопередачи связана со многими факторами, в частности, с учетом в аппроксимируемых численных расчетах влияния излучения воздуха перед ударной волной, турбулентности, экранирования парами метеороида; с неопределенностью в оптических свойствах горячего воздуха и паров, с неизвестностью реальной формы тела.

Теплота абляции  $Q$ , или эффективная (за счет разных механизмов) теплота уноса массы, в литературе считается постоянной при моделировании взаимодействия крупных метеороидов с атмосферой и чаще всего полагается равной теплоте испарения обыкновенных хондритов и железных метеоритов, равной  $8 \text{ км}^2/\text{с}^2$ . Однако механизм уноса массы по мере торможения метеороида меняется, приближаясь при небольших скоростях к уносу массы только за счет плавления и сдувания жидкой пленки ( $2 \text{ км}^2/\text{с}^2$ ), а также за счет механической эрозии (шелушения) ( $1.4 \text{ км}^2/\text{с}^2$ ). Как отмечается в [7], механизм уноса массы сильно зависит от скорости. Поэтому в [6] была проведена интерполяция параметра  $Q$  вдоль траектории между теплотой испарения и теплотой плавления (или эрозии) в зависимости от скорости  $V$ .



В данной работе мы видоизменили интерполяционное соотношение [6] и привели его к более простому и понятному виду

$$Q(V) = (Q_{vap} - Q_{min}) \frac{V^2 - V_{min}^2}{V_{vap}^2 - V_{min}^2} + Q_{min} \quad (4)$$

В выражение для теплоты абляции входят ее максимальное значение – теплота испарения  $Q_{vap}$ , и минимальное значение  $Q_{min}$  т.е. теплота плавления  $Q_{mel}$  или эрозии  $Q_{er}$  (как показано в [6], разница в результатах моделирования при  $Q_{min} = Q_{mel}$  и  $Q_{min} = Q_{er}$  получается незначительная).  $V_{vap}$  соответствует скорости, выше которой унос массы за счет плавления и эрозии пренебрежимо мал и определяющим механизмом абляции является испарение.  $V_{min}$  соответствует скорости, где испарения уже не происходит и механизм абляции – плавление и (или) эрозия. При численном моделировании использовались как постоянные значения  $Q$ , так и зависимость  $Q(V)$  (4).

### 3. Результаты расчетов и обсуждение

Целью работы являлось оценить погрешность моделирования различных характеристик взаимодействия метеороида с атмосферой Земли, связанную с неточностью задания модели абляции, при разных углах входа метеороида в атмосферу. Для этого система уравнений (1)–(4) решалась численно методом Рунге – Кутты при разных способах задания коэффициента теплопередачи и удельной теплоты абляции и разных начальных скоростях, массах и углах входа метеороида в атмосферу. Угол входа  $\theta_e$  варьировался от  $15^\circ$  до  $90^\circ$ . Начальная скорость  $V_e$  полагалась равной 13 и 19 км/с, начальный радиус  $R_e$  – 10 и 30 см, при этом начальная масса была 13.8 и 373 кг. Плотность метеороида в расчетах была постоянной  $\delta = 3.3 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup> (характерная плотность обыкновенных хондритов, в частности, Челябинского). Коэффициент теплопередачи  $C_H$  рассчитывался с использованием соотношения (3), в котором параметр неопределенности  $\psi$  полагался равным 0 (отсутствие абляции), 0.4, 0.7, 1 (наиболее вероятные значения  $\psi$  лежат в интервале от 0.4 до 1). Удельная теплота абляции  $Q$  задавалась как постоянной: теплота испарения 8 км<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>, теплота плавления 2 км<sup>2</sup>/с<sup>2</sup> или эрозии 1.4 км<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>, так и переменной вдоль траектории, зависящей от скорости:  $Q(V)$  рассчитывалась по формуле (4).

По наблюдениям известно, что крупные метеорные тела подвергаются основной фрагментации преимущественно на высотах от 50 до 25 км. На начальном участке траектории до начала дробления масса и скорость таких тел меняются слабо [9, 12], как и угол траектории по отношению к горизонту [9, 10]. Поэтому мы проводили расчеты, начиная с высоты 50 км, рассматривая метеорные тела, взаимодействующие с атмосферой, как фрагменты исходного метеороида, образовавшиеся после его разрушения. Ранее было показано [6], что результаты численного моделирования, полученные для начальных высот 50 и 80 км, практически совпадают друг с другом (при отсутствии дробления), небольшое расхождение наблюдалось только в районе пика энерговыделения.

#### 3.1. Коэффициент теплопередачи и удельная теплота абляции

В этом разделе представлены результаты расчета коэффициента теплопередачи  $C_H$  и теплоты абляции  $Q$ . Эти параметры задаются формулами (3) и (4), и поскольку они определяются из совместного решения системы уравнений (1)–(4), интересно посмотреть, как они меняются вдоль траектории при разных начальных условиях и насколько они отличаются от постоянных значений, которые принято задавать для них в литературе. Зависимость удельной теплоты абляции  $Q$  от высоты полета  $h$  при разных способах задания  $C_H$ , т.е. разных значениях  $\psi$  в соотношении (3), и зависимости коэффициента теплопередачи от высоты  $h$  при разных способах задания  $Q$  и  $C_H$  (разных  $\psi$ ) показаны на рис. 1–3 при  $R_e = 10$  и 30 см,  $V_e = 13$  и 19 км/с,  $\theta_e = 15, 40, 65, 90^\circ$ .

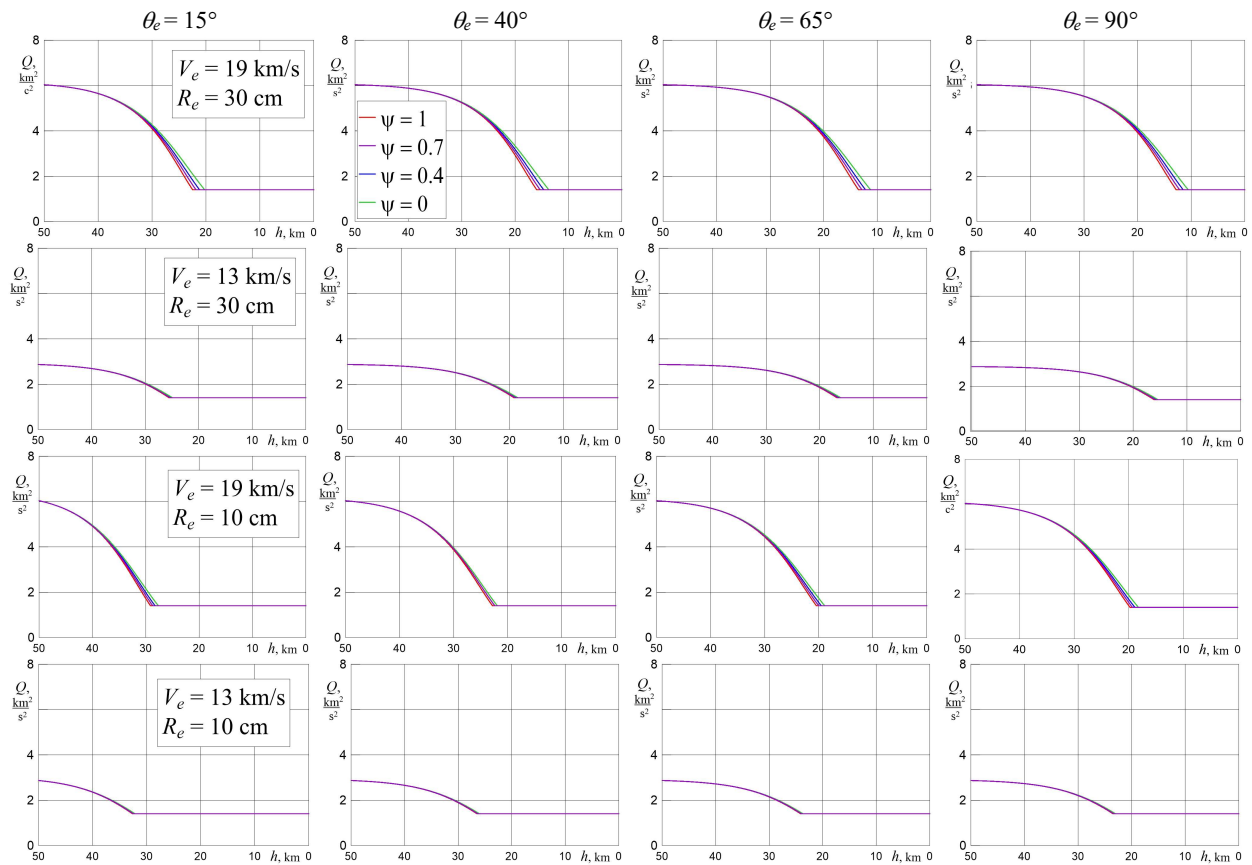


Рис. 1. Теплота абляции  $Q(V)$  при разном задании  $C_H$  (параметра  $\psi$ ) и разных начальных данных

Анализ представленных на рис. 1 зависимостей показывает небольшое влияние начального угла наклона траектории  $\theta_e$  на изменение теплоты абляции  $Q(V)$ , определяемой уравнением (4). Оно проявляется в том, что с увеличением  $\theta_e$  выход теплоты абляции на минимальное значение, в данном случае равное теплоте эрозии, происходит на более низкой высоте. Эта тенденция характерна для разных начальных скоростей  $V_e$ , радиусов  $R_e$  и разных значений параметра  $\psi$ . Например, при  $R_e = 30$  см,  $V_e = 19$  км/с и  $\psi = 1$ ,  $Q$  снижается до минимума при  $\theta_e = 15$  и  $90^\circ$  соответственно на высотах  $\sim 23$  и  $13$  км, а при  $R_e = 10$  см,  $V_e = 13$  км/с – на высотах  $\sim 33$  и  $24$  км. При меньших размерах тела выход  $Q$  на минимум происходит на больших высотах. Уменьшение начальной скорости ведет и к увеличению высоты выхода  $Q$  на минимум, и к уменьшению самих значений  $Q$ , что естественно в силу зависимости теплоты абляции от скорости. Из рис. 1 также видно, что значение коэффициента теплопередачи  $C_H$  (разные  $\psi$  в соотношении (3)) оказывает слабое влияние на теплоту абляции при разных начальных параметрах, более заметно выраженное при больших скоростях и размерах.

Рисунок 2 демонстрирует влияние угла  $\theta_e$  на изменение коэффициента теплопередачи вдоль траектории при разных способах задания теплоты абляции  $Q$ , проявляющееся в том, что с увеличением  $\theta_e$  быстрое снижение  $C_H$  из-за быстрого торможения (см. следующий раздел) происходит на меньшей высоте. Это влияние  $\theta_e$  характерно для разных параметров  $V_e$  и  $R_e$  и разных  $Q$ . На первом участке траектории доминирует радиационная часть коэффициента  $C_H$ , а на конечном участке, когда метеороид уже значительно затормозился, – его конвективная часть. Из рис. 2 также видно небольшое влияние способа задания  $Q$  на  $C_H$ , которое не зависит от угла  $\theta_e$ , более заметно проявляется при больших скоростях и размерах и практически незаметно при  $R_e = 10$  см и  $V_e = 13$  км/с.

Изменение коэффициента теплопередачи вдоль траектории при разных значениях параметра  $\psi$  и разных  $\theta_e$ ,  $R_e$  и  $V_e$  показано на рис. 3. Влияние угла  $\theta_e$  на  $C_H$ , как и при разных способах задания  $Q$ , проявляется в том, что с увеличением  $\theta_e$  быстрое снижение  $C_H$  из-за

быстрого торможения происходит на меньшей высоте. Уменьшение начальной скорости ведет к уменьшению значений  $C_H$  и к тому, что снижение  $C_H$  начинается несколько выше. Уменьшение размера тела ведет к тому, что снижение  $C_H$  начинается выше и происходит более плавно, что особенно заметно при  $R_e = 10$  см и  $V_e = 13$  км/с. Отметим, что зависимости  $Q$  и  $C_H$  от высоты  $h$  близки при  $\theta_e = 65^\circ$  и  $90^\circ$ , т.е. с увеличением угла  $\theta_e$  его влияние уменьшается, а примерно при  $\theta_e > 65^\circ$  практически отсутствует.

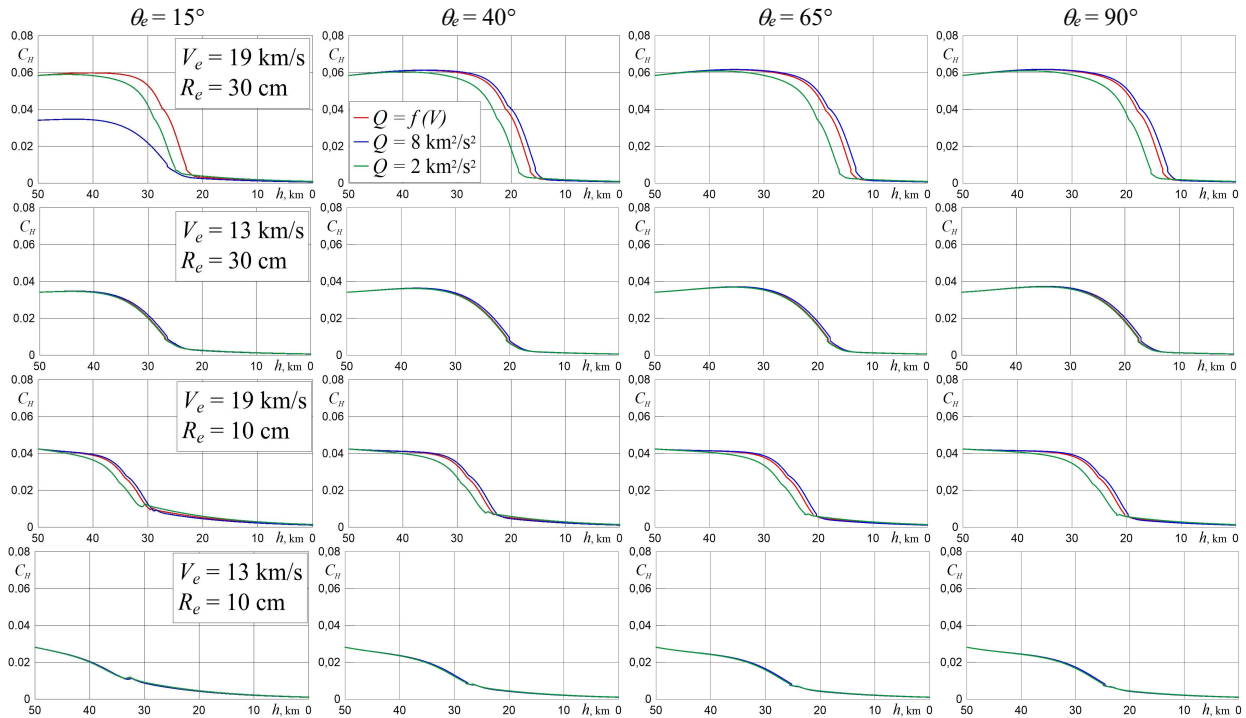


Рис. 2. Коэффициент теплопередачи  $C_H$  ( $\psi = 1$ ) при разном задании  $Q$  и разных начальных данных

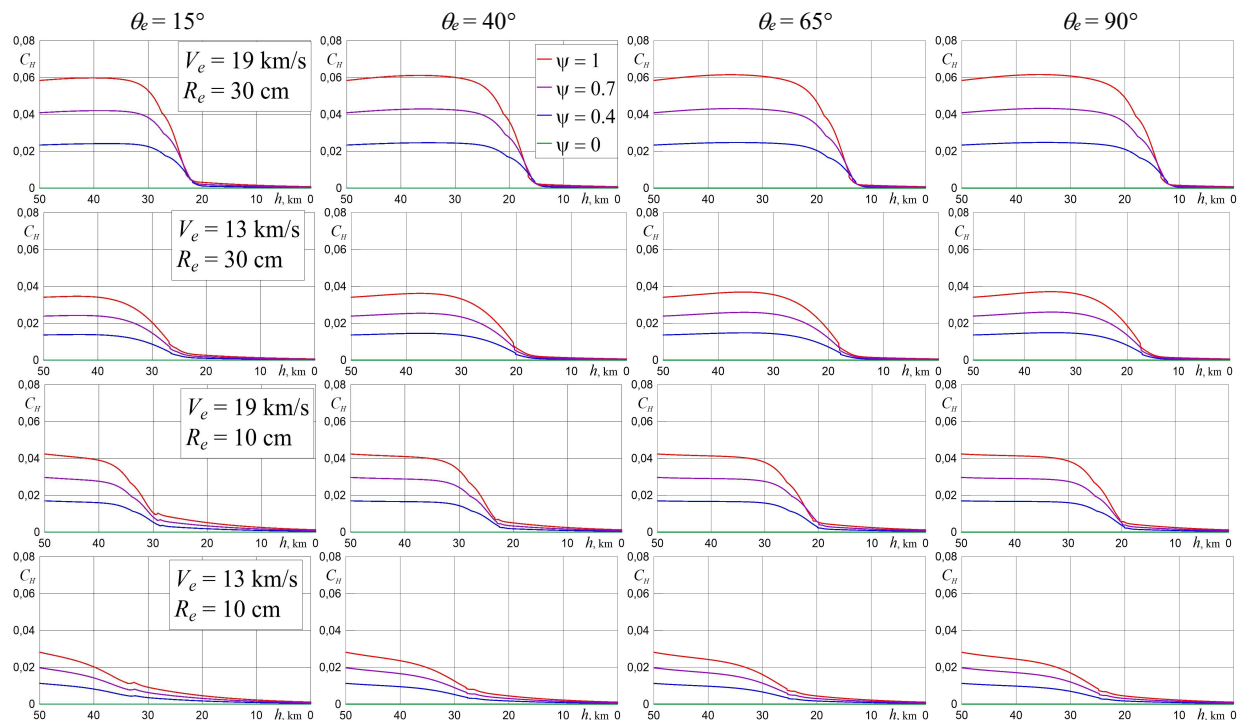


Рис. 3. Коэффициент теплопередачи  $C(H)$  при  $Q(V)$ , разных  $\psi$  и разных начальных данных

### 3.2. Скорость, масса и энерговыделение

Влияние угла входа в атмосферу  $\theta_e$  на скорость метеороида при разных начальных скоростях и размерах показано на рис. 4 и 5 для разных способов задания теплоты абляции  $Q$  и коэффициента теплопередачи  $C_H$  (разных  $\psi$ ). С увеличением  $\theta_e$  торможение происходит ниже, т.е. одна и та же скорость достигается на меньшей высоте. Эта тенденция характерна для разных  $Q$  и  $C_H$  и разных значений  $V_e$  и  $R_e$ . Уменьшение скорости  $V_e$  ведет к уменьшению влияния способа задания  $Q$  и  $C_H$  на скорость метеороида при всех  $\theta_e$ . Уменьшение размера  $R_e$  ведет к более раннему торможению.

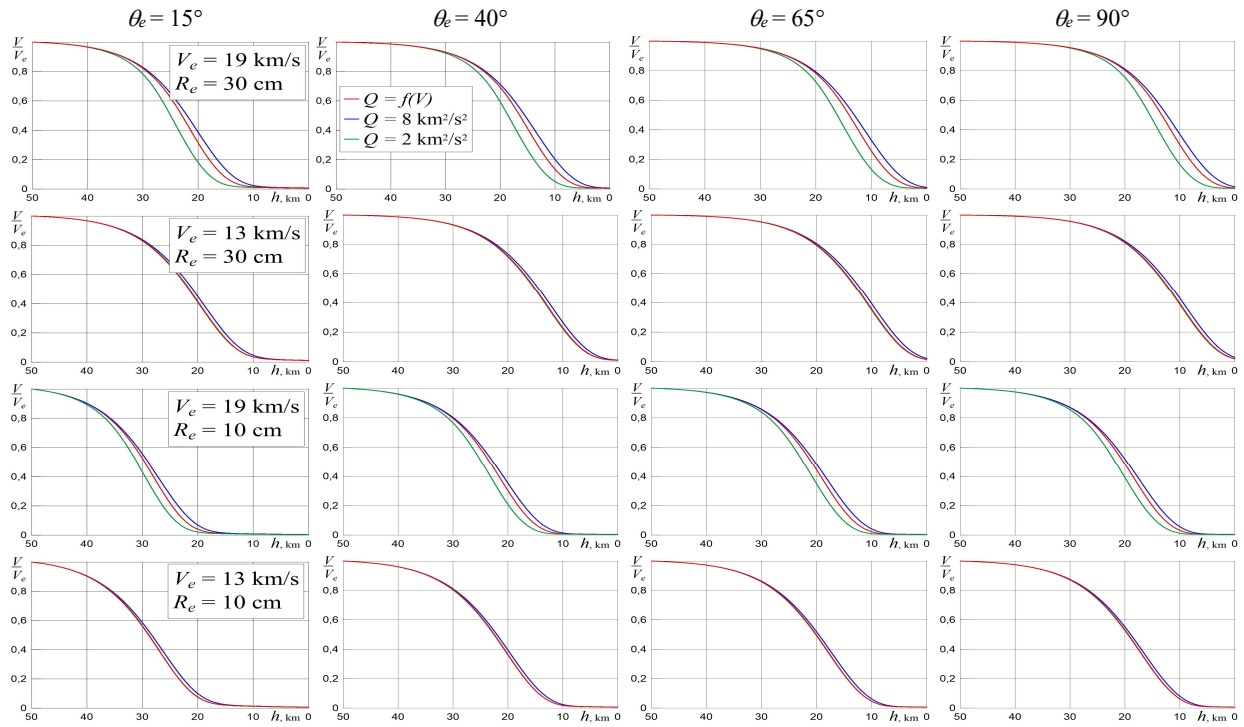


Рис. 4. Относительная скорость  $V/V_e$  при разном задании  $Q$ ,  $\psi = 1$  и разных начальных данных

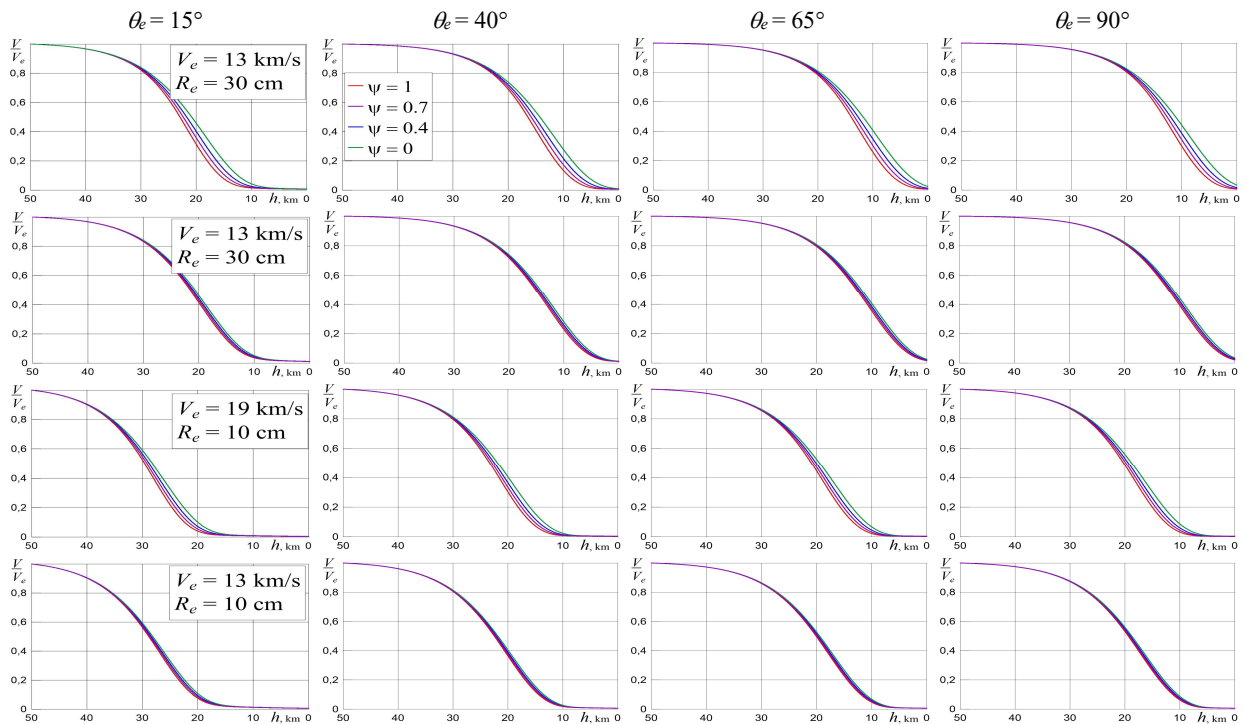


Рис. 5. Относительная скорость  $V/V_e$  при разных  $\psi$ ,  $Q(V)$  и разных начальных данных

Влияние угла  $\theta_e$  на унос массы метеороида вдоль траектории при разных начальных параметрах и разных способах задания теплоты абляции и коэффициента теплопередачи (разных  $\psi$ ) показано на рис. 6 и 7. С увеличением  $\theta_e$  масса достигает своего минимального значения (когда прекращаются процессы абляции – испарение, плавление и эрозия) на меньшей высоте. Эта тенденция характерна для разных способов задания  $Q$  и  $C_H$  и разных начальных скоростей и размеров. Увеличение угла  $\theta_e$  ведет также к небольшому увеличению остаточной массы, которое заметно для малого  $R_e = 10$  см. Для тела меньшего размера выход его массы на минимум происходит выше.

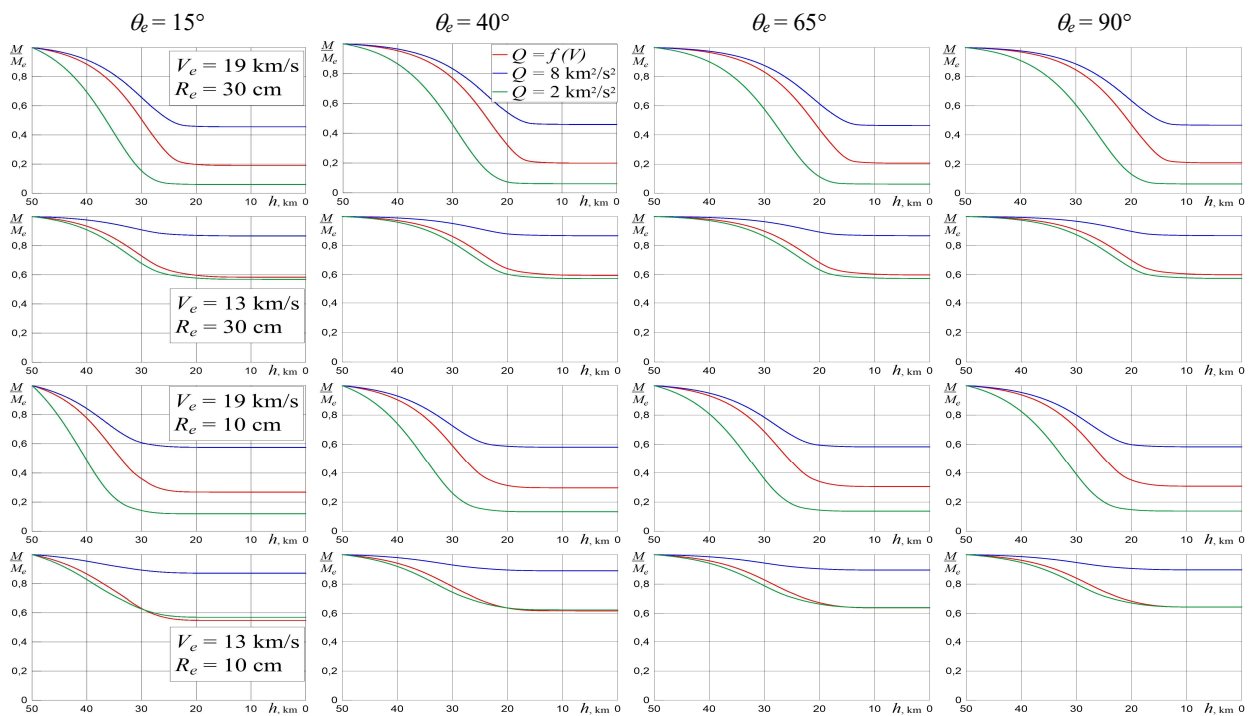


Рис. 6. Относительная масса  $M/M_e$  при разном задании  $Q$ ,  $\psi = 1$  и разных начальных данных

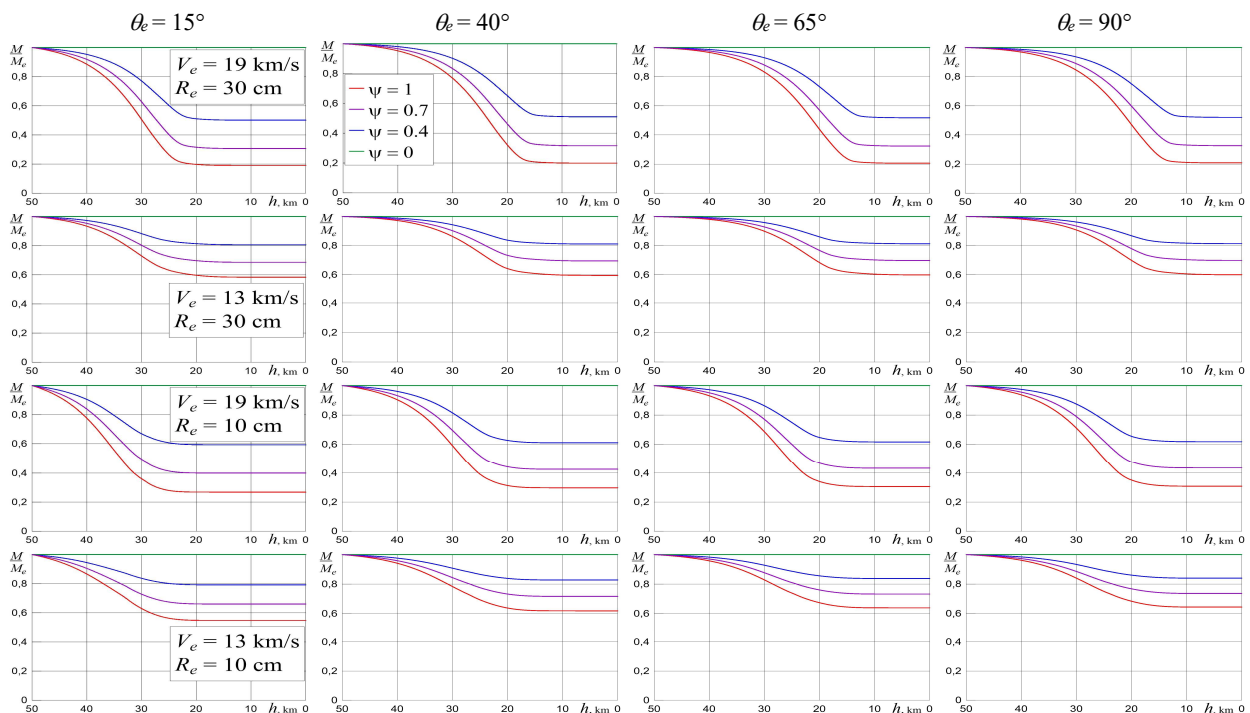


Рис. 7. Относительная масса  $M/M_e$  при разных  $\psi$ ,  $Q(V)$  и разных начальных данных



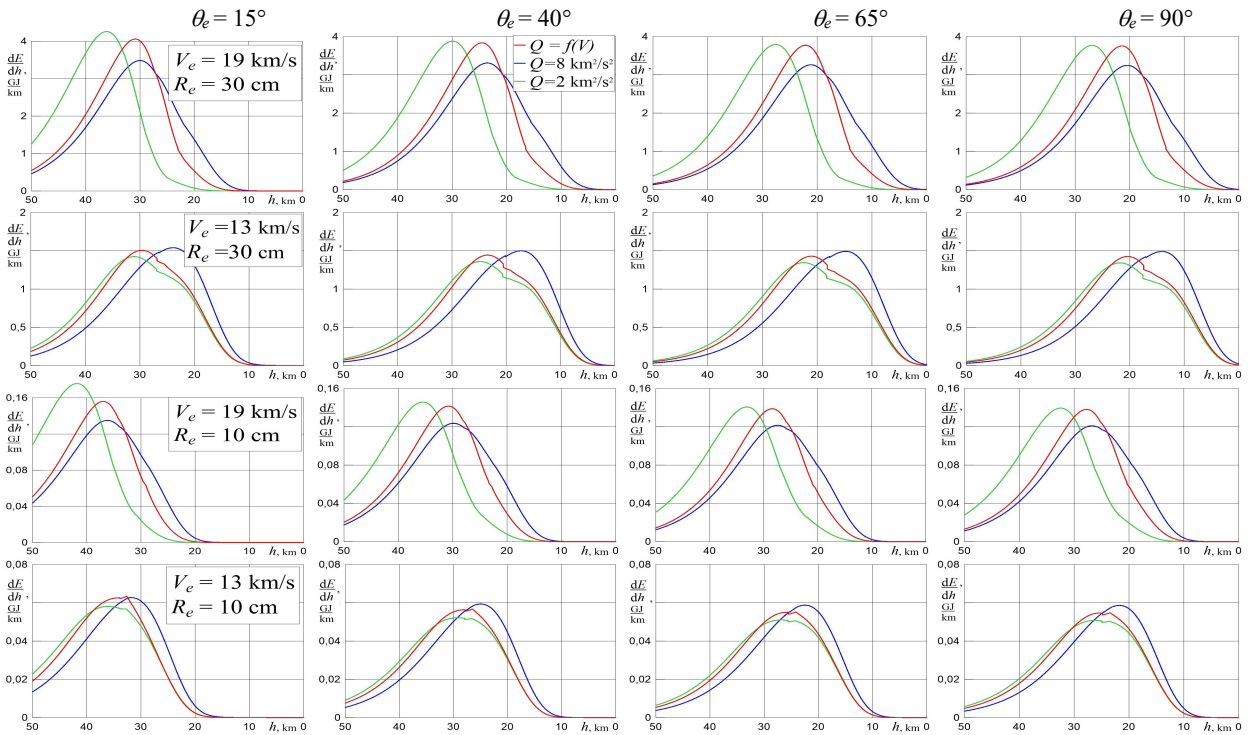


Рис. 8. Энерговыведение  $dE/dh$  при разном задании  $Q$ ,  $\psi=1$  и разных начальных данных

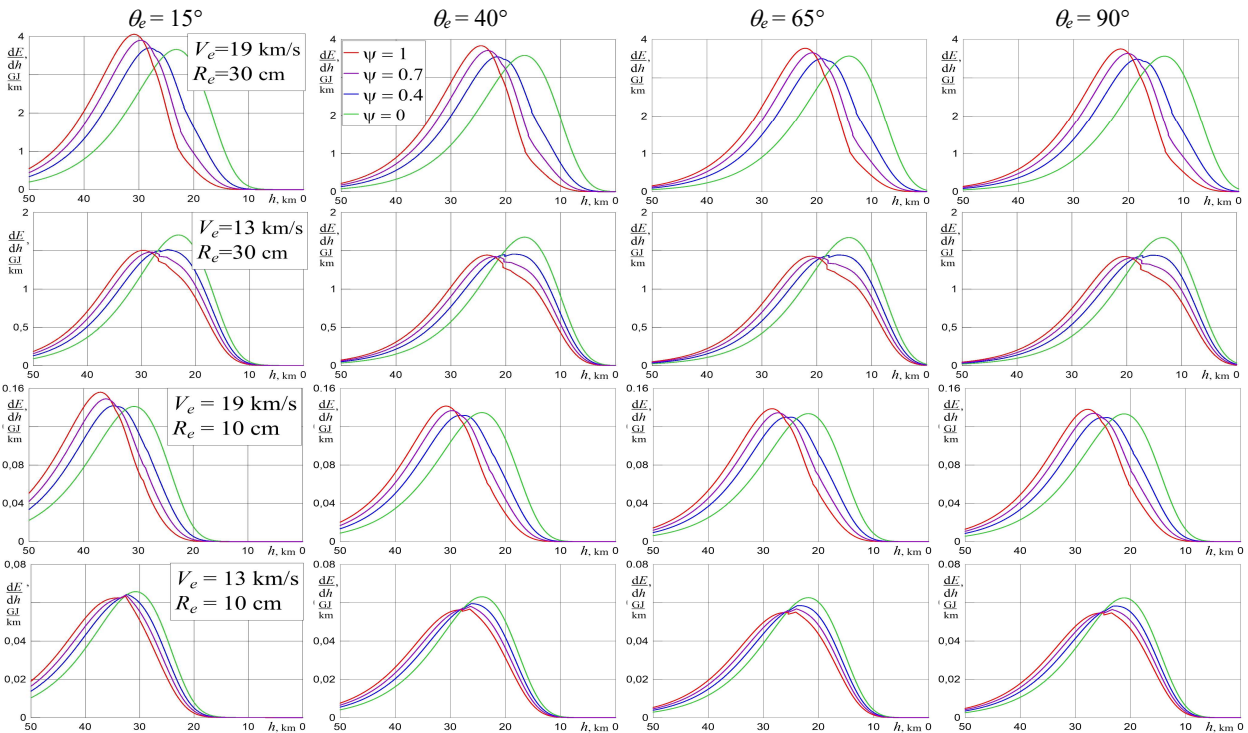


Рис. 9. Энерговыведение  $dE/dh$  при разных  $\psi$ ,  $Q(V)$  и разных начальных данных

Рисунки 8 и 9 демонстрируют влияние начального угла  $\theta_e$  на энерговыведение метеороида вдоль траектории при разных начальных скоростях и размерах и разных способах задания теплоты абляции и коэффициента теплопередачи. Уменьшение угла  $\theta_e$  ведет к увеличению максимального энерговыведения и к увеличению высоты, на которой достигается этот максимум (пик яркости болида). Эта тенденция имеет место для разных способов задания  $Q$  и  $C_H$  и разных скоростей  $V_e$  и радиусов  $R_e$ . Например, когда угол  $\theta_e$  меняется от  $65^\circ$  до  $15^\circ$ ,

максимум энерговыделения увеличивается примерно на 14 % при  $V_e = 19$  км/с,  $R_e = 10$  см,  $Q(V)$ ,  $\psi = 1$ , а высота, где он достигается, увеличивается примерно на 9 км при задании  $Q(V)$  и разных  $V_e$ ,  $R_e$  и  $\psi$ .

Уменьшение начальной массы и скорости ведет к значительному снижению выделяемой энергии, что естественно. Для меньших тел максимальное энерговыделение происходит выше. Уменьшение начальной скорости ведет к некоторому смещению пика яркости на более низкие высоты, что заметнее для меньших тел, и к снижению влияния способов задания  $Q$  и  $C_H$  на моделируемое энерговыделение, особенно для небольших тел. Результаты расчетов при  $Q = 2$  км<sup>2</sup>/с<sup>2</sup> близки к результатам расчетов при задании  $Q(V)$  по формуле (4) при небольших  $V_e$ . Результаты расчетов при  $Q = 8$  км<sup>2</sup>/с<sup>2</sup> далеки от результатов расчетов при задании  $Q(V)$  при любых скоростях.

Отметим некоторые общие особенности влияния начального угла траектории на изменение вдоль нее массы, скорости и энерговыделения метеорного тела. Во-первых, это влияние тем больше, чем меньше угол  $\theta_e$  и убывает с его увеличением. Например, разница в поведении перечисленных характеристик при  $\theta_e = 15^\circ$  и  $40^\circ$  больше, чем при  $\theta_e = 40^\circ$  и  $65^\circ$ , и почти неразличима для  $\theta_e = 65^\circ$  и  $90^\circ$ . Это имеет место для разных начальных параметров и разных способов задания теплоты абляции и коэффициента теплопередачи. Во-вторых, изменение угла  $\theta_e$  слабо сказывается на характере влияния способов задания  $Q$  и  $C_H$  на потерю массы, скорость и энерговыделение метеорного тела (рис. 4–9). Поясним это на примере моделирования взаимодействия с атмосферой метеорного тела с начальными параметрами  $V_e = 19$  км/с и  $R_e = 30$  см в случае задания теплоты абляции  $Q(V)$  по формуле (4). Расчетная остаточная масса такого тела при  $\psi = 1$  примерно в 2.5 раза превосходит его остаточную массу при  $\psi = 0.4$  и при  $\theta_e = 15^\circ$ , и при  $\theta_e = 40^\circ$ , и при  $\theta_e = 90^\circ$  (рис. 7).

### 3.3. Траектория. Места падения метеоритов

Угол входа метеорного тела в атмосферу существенно сказывается на характере влияния способов задания теплоты абляции и коэффициента теплопередачи на результаты расчета траектории и мест падения метеоритов (в отличие от расчетов массы, скорости и энерговыделения). Траектории метеороида  $h(l)$ , где  $l$  – расстояние вдоль горизонтальной поверхности Земли (значение  $l$  полагалось равным 0 при  $h = 50$  км), при разных начальных данных  $\theta_e$ ,  $V_e$ ,  $R_e$  и при разных способах задания  $Q$  и  $C_H$  (разных  $\psi$ ) показаны на рис. 10 и 11. Точка пересечения траектории с горизонтальной осью показывает место падения на землю неиспарившейся остаточной массы (метеорита).

Чем больше начальный угол траектории, тем на большем участке сохраняется ее прямолинейность и, соответственно, тем ниже начинает проявляться влияние на нее  $Q$  и  $C_H$ . Чем меньше метеорное тело, тем выше начинает искривляться траектория, и на большем ее участке проявляется влияние  $Q$  и  $C_H$ . Увеличение начальной скорости ведет к небольшому увеличению высоты начала искривления траектории и к более сильному влиянию на нее  $Q$  и  $C_H$ . Эти тенденции имеют место для всех начальных углов  $\theta_e$ . При небольших начальных скоростях ( $V_e < 14$  км/с) влияние  $Q$  и  $C_H$  на траекторию невелико, при этом результаты расчетов с постоянным значением  $Q$ , равным теплоте плавления, довольно близки к результатам расчетов с переменной, зависящей от скорости, теплотой абляции  $Q(V)$ . Это объясняется тем, что при небольших скоростях плавление и эрозия являются основными механизмами уноса массы.

Самое большое влияние угол входа метеороида в атмосферу оказывает на разброс результатов моделирования, обусловленный разными способами задания теплоты абляции и коэффициента теплопередачи, при предсказании мест падения метеоритов. Чем меньше угол  $\theta_e$ , тем больше разброс результатов расчета заключительного участка траектории и, соответственно, мест падения метеоритов, при разных способах задания  $Q$  и  $C_H$ , иными словами, тем сильнее влияние модели абляции.

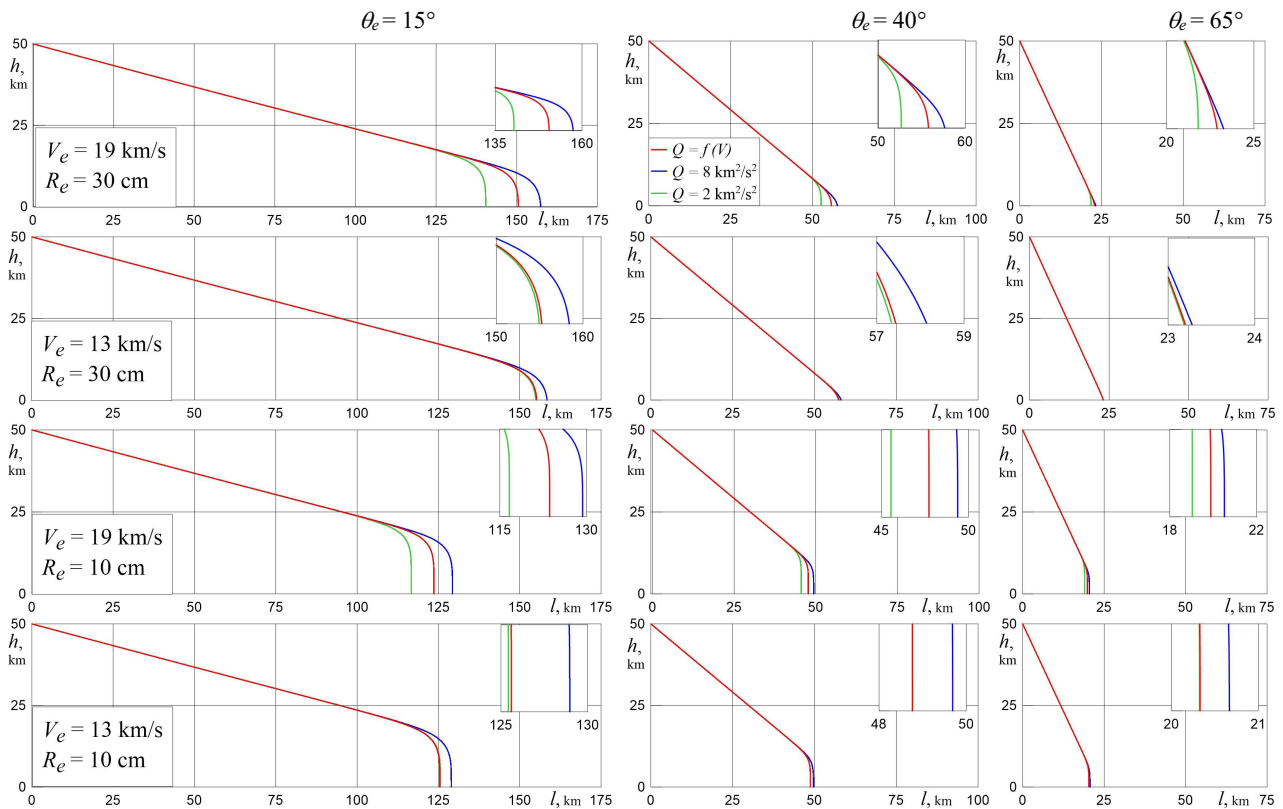


Рис. 10. Траектория  $h(l)$  при разном задании  $Q$ ,  $\psi = 1$  и разных начальных данных

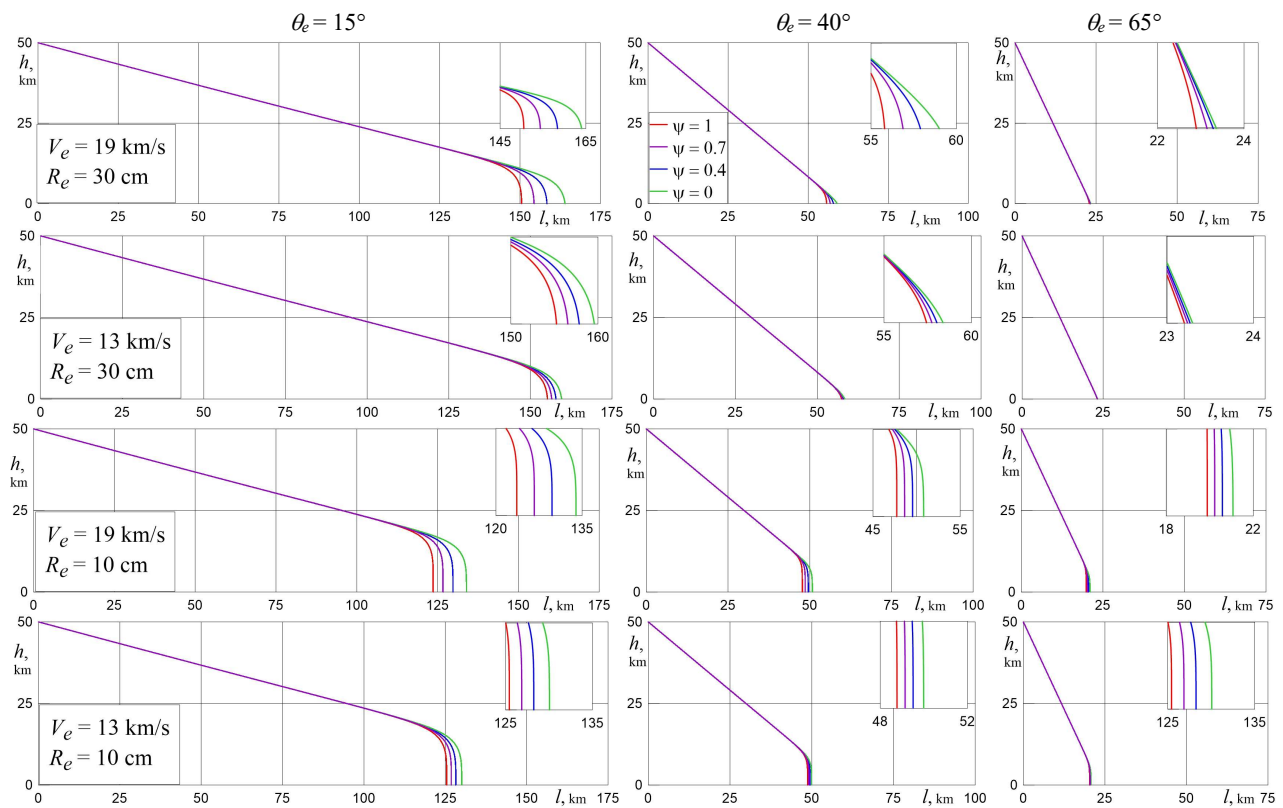


Рис. 11. Траектория  $h(l)$  при разных  $\psi$ ,  $Q(V)$  и разных начальных данных

Так, в случае  $V_e = 19$  км/с,  $R_e = 30$  см и  $Q = Q(V)$ , при  $\theta_e = 65, 40, 18$  и  $15^\circ$  расхождение между расчетными координатами точки падения метеорита достигает соответственно  $\sim 0.4$  км, 3.5 (2.5) км, 11 (7) км и 14 (8.5) км, когда параметр  $\psi$  меняется от 1 до 0 (от 1 до



0.4). Для тех же  $V_e, R_e$  и  $\psi = 1$ , при  $\theta_e = 65, 40, 18$  и  $15^\circ$  расхождение между координатами точки падения метеорита составляет соответственно  $\sim 1.5$  (1.1; 0.4) км, 5 (3.2; 1.8) км, 14 (8.4; 5.6) км и 17.5 (10; 7.5) км, когда  $Q = 2$  и  $8 \text{ км}^2/\text{с}^2$  ( $Q = Q(V)$  и  $2 \text{ км}^2/\text{с}^2$ ;  $Q = Q(V)$  и  $8 \text{ км}^2/\text{с}^2$ ).

Таким образом, в рассматриваемом диапазоне начальных параметров максимальное расхождение между предсказываемыми местами падения метеоритов при разных способах задания  $C_H$  составляет  $\sim 14$  км, а в наиболее вероятном диапазоне изменения  $\psi$  (от 1 до 0.4)  $\sim 8.5$  км. Максимальное расхождение при разных способах задания  $Q$  составляет  $\sim 17.5$  км, а при задании переменного  $Q$  и  $Q = 2$  или  $8 \text{ км}^2/\text{с}^2$   $\sim 10$  или  $7.5$  км. Отметим, что расхождение между координатами точек падения метеорита, связанное со способами задания  $Q$  и  $C_H$ , слабо зависит от начального размера (в диапазоне  $10 \div 30$  см) и довольно сильно зависит от начальной скорости, уменьшаясь с ее уменьшением. Отметим также, что фрагменты с меньшей массой быстрее тормозятся и падают на землю раньше фрагментов более массивных. Фрагменты малой массы достигают поверхности Земли под большим углом, близким к  $90^\circ$ .

## 5. Заключение

Исследовано, как влияет угол входа метеорного тела в атмосферу на возможную погрешность моделирования различных характеристик его взаимодействия с ней, связанную с неточностью задания модели абляции. Исследование проведено путем численного решения уравнений метеорной физики при разных способах задания коэффициента теплопередачи  $C_H$  и теплоты абляции  $Q$  и разных начальных скоростях, массах и углах входа метеороида в атмосферу. Показано, что значение начального угла траектории метеорного тела  $\theta_e$  слабо сказывается на характере влияния способов задания  $C_H$  и  $Q$  на результаты расчета массы, скорости и энерговыделения. В то же время значение  $\theta_e$  существенно сказывается на характере влияния способов задания  $C_H$  и  $Q$  на результаты расчета траектории и мест падения метеоритов. Чем меньше начальный угол, тем сильнее это влияние и значительнее разброс результатов моделирования заключительного участка траектории и, соответственно, мест падения метеоритов.

## Литература

1. Бронштэн В. А. Физика метеорных явлений. М.: Наука, 1981. 416 с.
2. Суржиков С.Т., Шувалов М.П. Тестирование расчетных данных по радиационному и конвективному нагреву спускаемых космических аппаратов нового поколения // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51. № 3. С. 456–470.
3. Суржиков С.Т., Шувалов М.П. Анализ радиационно-конвективного нагрева четырех типов спускаемых космических аппаратов // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т. 15, вып. 4. <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-4/articles/237/>
4. Брыкина И.Г., Егорова Л.А. Аппроксимационные формулы для радиационного теплового потока при больших скоростях // Изв. РАН. МЖГ. 2019. № 4. С. 123–134.
5. Брыкина И.Г., Егорова Л.А. О параметре абляции в задаче о входе метеорного тела в атмосферу // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2021. Т. 22, вып. 5. <http://chemphys.edu.ru/issues/2021-22-5/articles/959/>
6. Брыкина И.Г., Егорова Л.А. О влиянии эффективной теплоты абляции на моделирование взаимодействия метеороидов с атмосферой // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2022. Т. 23, вып. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-2/articles/995/>
7. Adams M. C. Recent advances in ablation // American Rocket Society J. 1959. Vol. 29. № 9. Pp. 625–632.
8. Брыкина И.Г., Егорова Л.А. О неопределенности моделирования взаимодействия метеороида с атмосферой при разных скоростях входа // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2023. Т. 24, вып. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2023-24-1/articles/1034/>

9. Borovička J., Spurný P., Brown P., Wiegert P., Kalenda P., Clark D., Shrbený L. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor // *Nature*. 2013. Vol. 503. P. 235.
10. Брыкина И.Г., Егорова Л.А. Моделирование движения, абляции и энерговыделения метеороида в атмосфере с учетом криволинейности траектории // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2020. Т. 21, вып. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2020-21-2/articles/903/>
11. Стулов В.П., Мирский В.Н., Вислый А.И. *Аэродинамика болидов*. М.: Наука, 1995. 236 с.
12. Brykina I.G., Bragin M.D. On models of meteoroid disruption into the cloud of fragments // *Planetary & Space Sci.* 2020. Vol. 187. No 104942.

## References

1. Bronshten V. A., *Physics of meteoric phenomena*, М.: Nauka, 1981, 416 p. [in Russian].
2. Surzhikov S. T., Shuvalov M. P., Checking computational data on radiative and convective heating of next generation spacecraft, *High Temperature*, 2013, vol. 51, pp. 408–420. <https://doi.org/10.1134/S0018151X13030061>
3. Surzhikov S. T., Shuvalov M. P., Estimation of radiation-convection heating of four types of reentry spacecrafts, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2014, vol. 15, no. 4 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-4/articles/237/>
4. Brykina I. G., Egorova L. A., Approximation formulas for the radiative heat flux at high velocities, *Fluid Dyn.*, 2019, vol. 54, pp. 562–574. <https://doi.org/10.1134/S0015462819040037>
5. Brykina I. G., Egorova L. A., On the ablation parameter in the problem of meteor body entering the atmosphere, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2021, vol. 22, no. 5 [in Russian]. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.22.5.959>
6. Brykina I. G., Egorova L. A., On the influence of the effective heat of ablation on modeling the interaction of meteoroids with the atmosphere, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2022, vol. 23, no. 2 [in Russian]. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.23.2.995>
7. Adams M. C., Recent advances in ablation, *American Rocket Society J.*, 1959, vol. 29, no. 9, pp. 625–632.
8. Brykina I. G., Egorova L. A., On the uncertainty of modeling the interaction of a meteoroid with the atmosphere at various entry velocities, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2023, vol. 24, no. 1 [in Russian]. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.24.1.1034>
9. Borovička J., Spurný P., Brown P., Wiegert P., Kalenda P., Clark D., Shrbený L., The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor”, *Nature*, 2013, vol. 503, pp. 235–237. <https://doi.org/10.1038/nature12671>
10. Brykina I. G., Egorova L. A., Modeling motion, ablation and energy deposition of meteoroid in the atmosphere taking account of the curved trajectory, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2020, vol. 21, no. 2 [in Russian]. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.21.2.903>
11. Stulov V. P., Mirskij V. N., Vislyj A. I., *Aerodynamics of bolides*, М.: Nauka, 1995, 236 p. [in Russian].
12. Brykina I. G., Bragin M. D., On models of meteoroid disruption into the cloud of fragments, *Planetary & Space Sci.*, 2020, vol. 187, no. 104942. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104942>

Статья поступила в редакцию 23 января 2024 г.