

УДК 620.76/78.004

О ТЕМПЕРАТУРАХ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО НАГРЕВА СФЕРИЧЕСКИХ МИКРОЧАСТИЦ, МОДЕЛИРУЮЩИХ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ, ВХОДЯЩИЕ В АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ С КОСМИЧЕСКИМИ СКОРОСТЯМИ

© 2024 г. Е. К. Колесников*, С. В. Чернов

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*email: e.kolesnikov@spbu.ru

Поступила в редакцию 16.06.2023

Переработанный вариант 07.08.2023

Принята к публикации 15.08.2023

Разработана математическая модель, описывающая движение в околоземном космическом пространстве (ОКП) и аэродинамический нагрев при входе в атмосферу сферических микрочастиц из углерода (графита) радиусами от 0.5 до 3 мкм, моделирующих споры земных бактерий, а также споры гипотетических бактерий внеземного происхождения. Модель основана на совместном численном решении уравнений движения в ОКП указанного модельного микробиологического объекта (МБО) и уравнения теплового баланса, описывающего изменение внутренней энергии МБО. Полученные расчетные данные показывают, что максимальные температуры аэродинамического нагрева спор земных бактерий, отделяющихся от поверхностей крупных низкоорбитальных объектов искусственного происхождения, оказываются существенно меньшими предельной температуры выживания спор земных бактерий при импульсном нагреве. Кроме того, результаты численных экспериментов дают основания для предположения, что споры гипотетических внеземных бактерий размером не более 1 мкм способны выдерживать аэродинамический нагрев при входе в атмосферу Земли со скоростями большими, чем вторая и третья космическая скорость.

DOI: 10.31857/S0023420624030038, EDN: JKIMGU

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что все возрастающее загрязнение околоземного космического пространства микробиологическими продуктами техногенной деятельности в космосе представляет угрозу не только для орбитальных космических аппаратов (КА), но и создает серьезные проблемы для экологии Земли. Это связано с тем, что, как показывают результаты проведенных к настоящему времени исследований, (см., например, работу [1]), входящие в плотные слои атмосферы техногенные микрочастицы (МЧ) с размерами $\lesssim 100$ мкм могут выдерживать аэродинамический нагрев и, сохраняя свои свойства, опускаются в приземные слои атмосферы и на земную поверхность. В определенных случаях, например, когда мы имеем дело с МЧ из радиоактивных материалов, а также из материалов, способных оказывать негативное воздействие на состояние озонового слоя стратосферы, указанные частицы представляют очевидную опасность для биосферы Земли.

Исследования последних лет показывают, что к числу потенциально опасных для экологии Земли микробиологических объектов относятся и возвращающиеся из космоса на Землю микробиологические объекты (МБО) земного происхождения. Последние

объекты могут выноситься с Земли в космос как в результате техногенной деятельности (на поверхностях КА и ракет-носителей (РН)), так и вследствие действия возможного “ионосферного лифта”, осуществляющего перенос тропосферного аэрозоля с поверхности Земли в верхнюю ионосферу, на существование которого косвенно указывают данные натурального эксперимента “Тест” [2].

Результаты натурных экспериментов в космосе, и, в частности, российского эксперимента “Биориск”, подготовленного и проведенного на МКС специалистами Института медико-биологических проблем РАН [3], показали, что споры некоторых земных микроорганизмов и грибов способны выжить даже при длительном (более 1.5 лет) нахождении в открытом космосе. При этом, они могут *мутировать*, приобретая новые свойства. Такие микробиологические объекты могут представлять опасность для земной биосферы, если их аэродинамический нагрев при входе в атмосферу недостаточен для стерилизации.

Для ответа на вопрос о возможности выживания входящих в атмосферу из космоса спор земных бактерий в настоящей работе проведен расчет зависимости от времени температуры

аэродинамического нагрева сферических МЧ из углерода соответствующих радиусов, моделирующих споры земных бактерий. Предполагалось, что указанные микрообъекты инжестируются в ОКП, покидая поверхность “материнского тела” (МТ), движущегося по низкой круговой орбите.

Кроме того, разработанные программы были использованы для расчета аэродинамического нагрева аналогичных микрообъектов, моделирующих споры гипотетических бактерий внеземного происхождения, полого входящих в атмосферу со скоростями большими второй и третьей космической скорости. Заметим, что в отличие от известной работы [4], в которой сделана приближенная теоретическая оценка максимальной температуры и длительности аэродинамического нагрева бактерий *E.coli*, входящих в атмосферу со скоростью, значительно превышающей вторую космическую, результаты настоящей работы получены с использованием достаточно близкой к реальной математической модели и могут представлять интерес для исследователей, работающих над обоснованием известной концепции “панспермии”.

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ОПИСЫВАЮЩАЯ ДВИЖЕНИЕ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ НАГРЕВ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ

Для определения возможных температур аэродинамического нагрева микробиологических объектов, входящих в атмосферу с космическими скоростями, как и в отмеченной выше работе [1], будем использовать математическую модель, основанную на совместном численном решении уравнений движения и уравнения внутренней энергии МБО. В качестве модели МБО, аналогично работе [4], будем рассматривать сферические частицы из углерода (графита), радиусом R от 0.5 до 3 мкм (что соответствует возможным размерам спор земных бактерий). Предполагается, что в начальный момент $t = 0$ МБО находится на заданной высоте H над земной поверхностью и движется со скоростью v_0 .

Как показывают оценки [5], для рассматриваемых значений радиуса МБО и начальной высоты H , можно пренебречь влиянием на динамику МБО электродинамических сил, обусловленных взаимодействием наводимого на МБО заряда с геомагнитным и геоэлектрическим полями на основных стадиях движения МБО в верхней и нижней атмосфере: стадии орбитального движения в ОКП; стадии сильного аэродинамического торможения, на которой и достигаются максимальные температуры аэродинамического нагрева МБО (реализуется на высотах > 100 км); а также — на стадии спуска “заторможенных” МБО в плотные слои атмосферы. В этих условиях основными силами, действующими

на МБО, являются: гравитационные силы; сила солнечного давления и сила сопротивления нейтральной компоненты фонового газа. Соответственно движение сферического МБО массой m и радиусом R в геоцентрической экваториальной инерциальной системе отсчета (Geocentric Equatorial Inertial; GEI) будет описываться уравнением:

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}_G + \mathbf{F}_G^{dst} + \mathbf{F}_{pr} + \mathbf{F}_{drag}, \quad (1)$$

где $\mathbf{v} = d\mathbf{r}/dt$ — скорость МБО в указанной системе отсчета; $\mathbf{r} = (x, y, z)$ — радиус-вектор МБО в декартовой системе координат, ось X которой направлена в точку весеннего равноденствия, ось Z направлена на северный географический полюс, а ось Y дополняет систему до правой.

В уравнении (1) сила

$$\mathbf{F}_G = -G \frac{mM_E}{r^3} \mathbf{r}$$

представляет собой гравитационную силу, действующую на МБО со стороны центрального гравитационного поля Земли (G — гравитационная постоянная; M_E — масса Земли), а сила

$$\mathbf{F}_G^{dst} = -m \nabla \left\{ \frac{GM_E J_2 R_E^2}{2r^3} (3 \sin^2 \phi - 1) \right\}$$

— возмущение силы $\mathbf{F}_G$, обусловленное полярным сжатием Земли (J_2 — второй зональный гармонический коэффициент; ϕ — географическая широта МБО; R_E — радиус Земли).

Сила солнечного давления $\mathbf{F}_{pr}$ на МБО определяется формулой:

$$\mathbf{F}_{pr} = Q_{pr} \frac{N \pi R^2}{c} P(\mathbf{r}) \mathbf{s},$$

где N — плотность потока энергии солнечного излучения, равная на орбите Земли $1.3533 \cdot 10^6$ эрг/см²с (т.н. солнечная постоянная); $Q_{pr} = Q_{pr}(R)$ — эффективность давления света на сферический МБО радиусом R , усредненная по солнечному спектру; $P(\mathbf{r})$ — т.н. “функция тени”, равная 1 на освещенном участке траектории и 0 — на теневом. Значения Q_{pr} определялись с использованием зависимости $Q_{pr} = Q_{pr}(R)$ для сферических однородных частиц из графита, рассчитанной в работе [6] с применением методов теории Ми [7]. При проведении численных расчетов разрывная теневая функция цилиндрической тени Земли аппроксимировалась непрерывной функцией

$$\begin{aligned} P(x_{GSE}, y_{GSE}, z_{GSE}) = \\ = \frac{1}{1 + \exp(\kappa x_{GSE})} \frac{1}{1 + \exp \left[-\kappa \left(\sqrt{y_{GSE}^2 + z_{GSE}^2} - R_E \right) \right]} + \\ + \frac{1}{1 + \exp(-\kappa x_{GSE})}, \end{aligned}$$

где постоянная $\kappa = 20000/R_E$, $x_{GSE}, y_{GSE}, z_{GSE}$ — координаты в геоцентрической солнечно-эклиптической системе (GSE), ось X_{GSE} которой направлена на Солнце, ось Z_{GSE} перпендикулярна плоскости эклиптики, а ось Y_{GSE} дополняет систему координат до правой.

Сила сопротивления F_{drag} для сферического МБО определяется формулой:

$$F_{drag} = -C_x \frac{\pi R^2}{2} \rho_a \tilde{v}^2 \frac{\tilde{v}}{v},$$

где $\tilde{v} = v - [\Omega, r]$ — скорость МБО в Гринвичской системе координат, вращающейся с угловой скоростью вращения Земли Ω (в которой покоится атмосферный газ); ρ_a — плотность газа верхней атмосферы; C_x — коэффициент сопротивления. Значение C_x в расчетах полагалось равным 2, что соответствует полной передаче МБО импульса молекул атмосферы при их столкновениях с МБО в свободномолекулярном режиме обтекания [8], когда длина свободного пробега молекул воздуха гораздо больше характерного размера МБО. Для рассмотренных радиусов МБО свободномолекулярный режим обтекания имеет место на высотах более 50 км. При численном моделировании движения в ОКП для задания плотности атмосферы в точке нахождения МБО использовалась кусочно-экспоненциальная аппроксимация высотного хода плотности верхней атмосферы, усредненного по суточным и сезонно-широтным вариациям для трех уровней солнечной и геомагнитной активности: низкой, средней и высокой, основанная на данных модели NRLMSISE-00 [9].

Уравнение теплового баланса, описывающее изменение внутренней энергии МБО (в расчете на единицу площади миделя МБО) имеет вид:

$$\frac{4}{3} R \rho C \frac{dT}{dt} = \frac{\rho_a \tilde{v}^3}{2} - 4\epsilon_c \sigma T^4 + \alpha N_{sun} P(r). \quad (2)$$

Выражение в левой части (2) представляет собой скорость изменения внутренней энергии МБО. В этом выражении: T — абсолютная температура МБО, а ρ и $C = C(T)$ — соответственно плотность и удельная теплоемкость его материала. Зависимость $C = C(T)$ находилась путем сплайн-интерполяции табличных значений из справочника [10]. Первым слагаемым в правой части (2) задается поток энергии, приносимой сталкивающимися с МБО молекулами атмосферного газа. Вторым слагаемым в правой части (2) определяется скорость потерь энергии МБО на лучеиспускание. В этом слагаемом: σ — постоянная Стефана — Больцмана, а $\epsilon_c = \epsilon_c(R, T, \eta)$ — т.н. “степень черноты”, которая представляет собой отношение плотности потока собственного излучения моделирующего МБО сферического микрообъекта из графита радиусом R , удельной электрической проводимостью η при температуре T , к плотности потока интегрального излучения абсолютно черного тела того же радиуса

при той же температуре. В расчетах для задания функции $\epsilon_c(R, T, \eta)$ мы воспользовались аналитическими выражениями, приведенными в работе [11]. Зависимость $\eta = \eta(T)$ находилась путем аппроксимации ортогональным полиномом табличных значений из справочника [12].

Наконец, последним слагаемым в правой части (2) задается вклад в скорость нагрева МБО потока энергии солнечного излучения, поглощаемого веществом МБО. В этом слагаемом: α — интегральный коэффициент поглощения излучения сферической частицей из графита, который определялся в приближении геометрической оптики; N_{sun} и $P(r)$ — определенные выше солнечная постоянная и функция тени.

В конкретных случаях зависимость температуры МБО от времени определялась на основе численного интегрирования уравнений (1) и (2), записанных в виде системы из семи обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка для координат, компонент скорости и температуры МБО.

В заключение этого раздела отметим, что для корректного описания временной эволюции температуры входящих в атмосферу более мелких микробиологических объектов, например, вирусов с радиусами $\sim (10...150)$ нм предлагаемая математическая модель требует существенной модификации. В частности, как показывают оценки [5], для МБО указанных размеров на орбитальной стадии движения, а также на стадии сильного аэродинамического торможения, основным эффектом электризации является воздействие на динамику МБО электродинамических сил, обусловленных взаимодействием наводимого на МБО заряда с магнитным и электрическим полями ОКП. Для учета этого эффекта уравнения движения и уравнения теплового баланса МБО должны решаться совместно с уравнением зарядки МБО в фоновой плазме (см., например, публикацию [13]). Вопрос о возможном влиянии эффекта электризации МБО на динамику “заторможенных” МБО, опускающихся в плотные слои атмосферы, требует дальнейшего исследования. Но определенные предположения по этому поводу можно высказать уже сейчас. Как следует из приведенных в работах [14, 15] расчетных данных, в полярной мезосфере электрический заряд наночастицы (НЧ) из материала с работой выхода ~ 4 эВ (близкой к работе выхода графита $\sim 4,7$ эВ) при размере НЧ порядка 100 нм, даже при умеренных потоках солнечного излучения, может достигать положительных значений порядка $10 |e|$, где e — заряд электрона. В нашем случае этот заряд соизмерим с зарядом моделирующей МБО сферической НЧ из углерода (графита) того же размера на орбитальном участке траектории, на котором в соответствии с данными работы [5] магнитная составляющая силы Лоренца будет давать

существенный вклад в полную силу, возмущающую движение НЧ в центральном гравитационном поле Земли. Тем не менее, прямой динамический эффект электризации МБО на мезосферных высотах будет, по-видимому, незначительным, поскольку скорость “заторможенного” МБО, опускающегося в плотные слои атмосферы, а, соответственно, и магнитная составляющая силы Лоренца, будут на порядки меньшими значений этих величин на орбитальном участке траектории МБО. Более вероятным представляется влияние на динамику спуска МБО в плотные слои атмосферы явления нуклеации МБО, вызываемой конденсацией на ней перенасыщенного водяного пара, присутствующего на высотах движения МБО. Возможность реализации условий перенасыщенности водяного пара в летней полярной мезосфере на высотах $\sim 80\ldots 90$ км показана в работе [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Первая серия проведенных нами численных экспериментов была направлена на выяснение способности спор земных бактерий, отделяющихся от поверхности крупного низкоорбитального объекта искусственного происхождения, выдержать аэродинамический нагрев при входе в плотные слои атмосферы. С этой целью были произведены расчеты зависимостей от времени температуры, моделирующих указанные МБО сферических микрочастиц из углерода радиусом 0.5, 1, 2 и 3 мкм. Расчет температуры производился с момента отделения от материнского тела, который принимался за начальный момент $t = 0$, до момента достижения МБО высоты 50 км, ниже которой для указанных значений радиуса МБО предположение о свободномолекулярном режиме обтекания становится некорректным. Во всех рассмотренных случаях предполагалось, что орбита МТ представляет собой круговую орбиту высотой 400 км, лежащую в плоскости земного экватора. Скорость МБО v_0 в начальный момент $t = 0$ полагалась равной скорости МТ. В этом случае начальная скорость МБО равна по величине 7.67 км/с (первая космическая скорость на высоте 400 км), лежит в плоскости земного экватора и составляет угол $i = 90^\circ$ с местной вертикалью. Начальная температура МБО в момент отделения полагалась равной равновесной температуре МБО, которая определялась из условия баланса поглощаемых и испускаемых МБО энергетических потоков. Расчеты проводились для различных значений долготы точки отделения λ , отсчитываемой от направления на точку весеннего равноденствия. Предполагалось, что во всех рассмотренных случаях момент отделения МБО от МТ соответствует моменту 12:00 UT 18.V.1996, в котором верхняя атмосфера находилась в условиях низкой солнечной и геомагнитной активности.

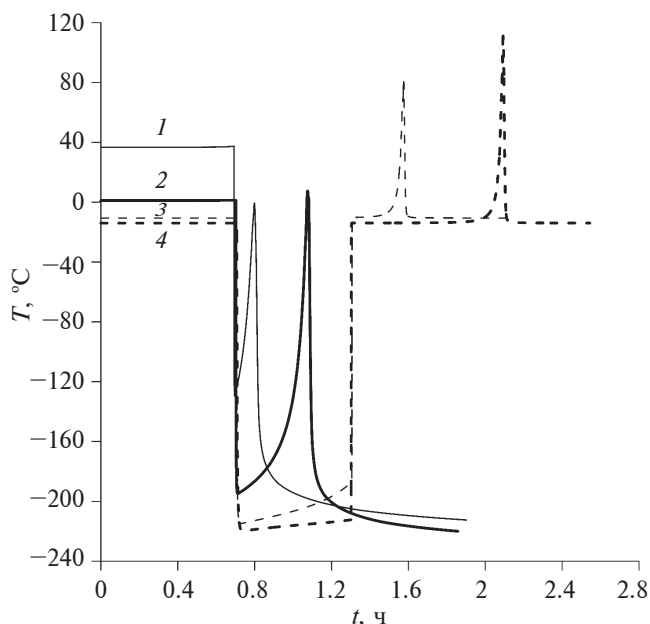


Рис. 1. Временной ход температуры МБО различного радиуса для значения долготы точки отделения $\lambda = 0^\circ$ при скорости 7.67 км/с: кривая 1 – 0.5 мкм; 2 – 1 мкм; 3 – 2 мкм; 4 – 3 мкм.

Проведем анализ полученных расчетных данных о временном ходе температур МБО различного радиуса для двух конкретных значений долготы точки отделения: $\lambda = 0^\circ$ и $\lambda = 310^\circ$.

Результаты расчетов для случая $\lambda = 0^\circ$ представлены на рис. 1.

Как видно из данных рис. 1, для МБО радиусом 0.5 мкм температура МБО, отделяющегося от материнского тела на освещенном участке орбиты МТ, сначала остается близкой к начальной равновесной температуре 37°C . Затем, после входа в тень Земли, в результате прекращения нагрева МБО потоком солнечного излучения, имеет место быстрое падение температуры, которое сменяется резким ростом температуры в результате вхождения МБО в более плотные слои атмосферы, приводящего к его интенсивному нагреву потоком энергии, приносимой сталкивающимися с МБО молекулами атмосферного газа. При этом, вследствие торможения МБО, его скорость $\dot{v}$ относительно атмосферного газа быстро уменьшается, что приводит к ослаблению аэродинамического нагрева МБО. В результате, достигнув локального максимума -1°C , температура МБО, прекращающего движение по орбите и не выходящего более из тени Земли, начинает монотонно снижаться, достигая весьма низкого значения -212°C к моменту достижения минимальной высоты моделирования. Отметим, что температура МБО в локальном максимуме в этом случае оказывается меньшей его температуры на освещенном участке орбиты.

Аналогичный характер имеет и зависимость от времени температуры МБО радиусом 1 мкм. При этом температура МБО на освещенном участке орбиты близка к начальной равновесной температуре 1°C , а температура в локальном максимуме увеличивается до 8°C , становясь, таким образом, немного большей температуры МБО на освещенном участке орбиты.

Существенно иной характер имеют зависимости от времени температуры МБО радиусами 2 и 3 мкм. Как видно из данных рис. 1, температура МБО радиусом 2 мкм на освещенном участке орбиты, как и в рассмотренных выше случаях, сначала остается близкой к начальной равновесной температуре -11°C . Затем, после входа в тень Земли, в результате прекращения нагрева МБО потоком солнечного излучения, имеет место быстрое падение температуры до минимального значения -215°C , после достижения которого начинается медленный рост температуры МБО, обусловленный сравнительно слабым на этой стадии орбитального движения нагревом МБО потоком сталкивающихся с МБО молекул атмосферного газа. После выхода МБО на освещенный участок орбиты, в результате возобновления нагрева МБО потоком солнечного излучения, происходит резкий скачок температуры МБО до значения близкого к начальному равновесному значению. Дальнейшее орбитальное движение, вследствие все возрастающего воздействия силы сопротивления, приводит к уменьшению высоты МБО над поверхностью Земли и попаданию МБО в более плотные слои атмосферы, что приводит к интенсивному нагреву МБО потоком энергии, приносимой на МБО молекулами атмосферного газа до максимальной температуры 82°C , после чего, температура МБО, прекратившего орбитальное существование и опускающегося в плотные слои атмосферы на освещенной стороне Земли, быстро уменьшается до температуры близкой к начальному равновесному значению, оставаясь практически постоянной вплоть до момента достижения минимальной высоты моделирования.

Как видно из данных рис. 1, аналогичный характер имеет и зависимость от времени температуры МБО радиусом 3 мкм. При этом температура МБО на освещенном участке орбиты близка к начальной равновесной температуре равной -14°C , а температура в локальном максимуме, который, как и в рассмотренном выше случае, достигается после прохождения МБО через тень Земли на освещенном участке траектории, увеличивается до 111°C .

Рассмотрим теперь результаты расчетов для случая $\lambda = 310^{\circ}$, представленные на рис. 2.

Из данных рис. 2 видно, что в этом случае отделение МБО от МТ происходит на освещенном участке орбиты МТ, и на начальном участке движения МБО в ОКП для всех рассмотренных значений радиуса температура МБО является практически

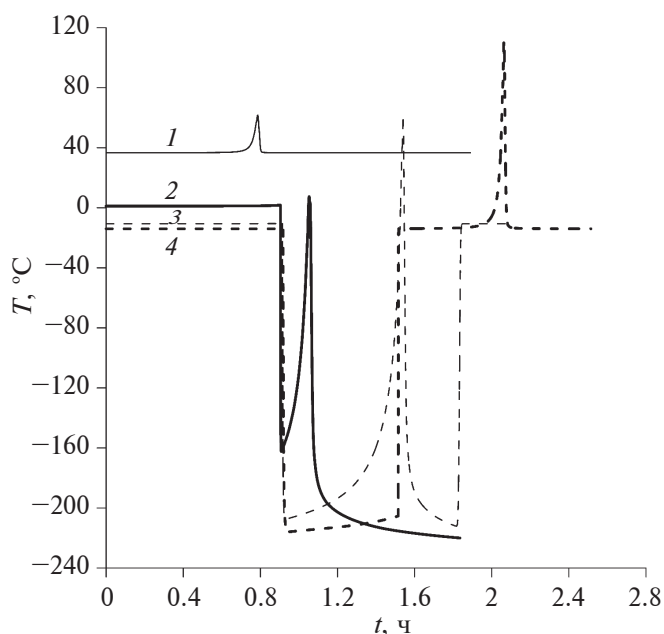


Рис. 2. Временной ход температуры МБО различного радиуса для значения долготы точки отделения $\lambda = 310^{\circ}$ при скорости 7.67 км/с : 1—0.5 мкм; 2—1 мкм; 3—2 мкм; 4—3 мкм.

постоянной, близкой к начальной равновесной температуре МБО на освещенном участке орбиты. Однако дальнейший ход температуры существенно зависит от радиуса МБО. В случае МБО радиусом 0.5 мкм на освещенном участке орбиты имеет место всплеск температуры МБО до максимального значения 62°C , обусловленный его нагревом в результате сильного аэродинамического торможения, после чего температура МБО, прекращающего орбитальное существование и, в дальнейшем, опускающегося в плотные слои атмосферы на дневной стороне Земли, возвращается к близкому к начальному равновесному значению 37°C и остается практически постоянной до момента достижения минимальной высоты моделирования. Изменение со временем температуры МБО радиусом 1 мкм происходит также, как и в рассмотренном выше случае отделения МБО того же радиуса в точке орбиты МТ с долготой $\lambda = 0^{\circ}$. При этом температура МБО в максимуме, который достигается после входа в тень Земли, такая же, как и в случае $\lambda = 0^{\circ}$, и равна 7°C . Локальный максимум температуры МБО радиусом 2 мкм равный 59°C , обусловленный ее нагревом в результате аэродинамического торможения, также имеет место при нахождении МБО в тени Земли. Как видно из данных рис. 2, после достижения локального максимума, температура МБО сначала падает до низкого значения -212°C , а затем, в результате выхода МБО, затормозившегося в атмосфере и вращающегося вместе с ней, из тени Земли, быстро возрастает до значения близкого к начальному равновесному

и остается практически постоянной вплоть до момента достижения минимальной высоты моделирования. Наконец, временной ход температуры МБО радиусом 3 мкм происходит также, как и в рассмотренном выше случае отделения МБО того же радиуса в точке орбиты МТ с долготой $\lambda = 0^\circ$. При этом, температура МБО в максимуме, который достигается на освещенном участке траектории после прохождения через тень Земли, такая же, как и в случае $\lambda = 0^\circ$, и равна 111°C .

Сравнение результатов расчета временного хода температур МБО в случаях $\lambda = 0^\circ$ и $\lambda = 310^\circ$ показывает, что для одинаковых значений радиуса МБО имеет место совпадение моментов $t_{\max}$, в которые достигаются локальные максимумы температуры, обусловленные аэродинамическим нагревом в верхней атмосфере. Кроме того, имеет место совпадение значений температуры в локальных максимумах, если в обоих случаях они достигаются либо на освещенном, либо на теневом участке орбиты. Если же в одном случае максимум температуры достигается на освещенном участке орбиты, а в другом случае — на теневом, наибольшее значение имеет температура в максимуме, который достигается на освещенном участке орбиты.

Результаты проведенных нами расчетов временного хода температур МБО с рассматриваемыми значениями радиуса для других долгот точки отделения λ показывают, что положение моментов достижения локальных максимумов температуры на временной оси в общем случае не зависит от λ . Одинаковыми являются и значения температуры в максимумах, достигаемых на освещенных и теневых участках орбит, равных, таким образом, максимальной и минимальной температуре аэродинамического нагрева МБО, отделяющихся от МТ на рассматриваемой орбите.

Как следует из вышеизложенного, в рассматриваемом случае максимальная температура аэродинамического нагрева модельного МБО из углерода достигается при радиусе МБО в 3 мкм и равна 111°C . При этом промежуток времени существенного аэродинамического нагрева, в течение которого температура МБО превышает 100°C , равен всего 20 с.

В соответствии с приведенными в работе [17] данными в случае импульсного нагрева продолжительностью ~ 20 с при температурах больших 250°C погибают споры любых земных бактерий. В дальнейшем температуру в 250°C будем рассматривать как предельную температуру выживания спор $T_{\text{кр}}$ при импульсном нагреве. Приведенные выше расчетные данные показывают, что максимальные температуры аэродинамического нагрева спор земных бактерий, отделяющихся от поверхностей крупных низкоорбитальных объектов искусственного происхождения, оказываются существенно меньшими $T_{\text{кр}}$. Таким образом, имеются

основания предполагать, что многие из спор земных бактерий, выносимых в ближний космос на нестерилизованных поверхностях космических аппаратов и последних ступеней ракет-носителей и выдерживающих воздействие факторов космической среды, в конце концов возвращаются на Землю, сохраняя свою жизнеспособность.

Вторая серия численных экспериментов была направлена на выяснение способности спор гипотетических бактерий внеземного происхождения выдержать аэродинамический нагрев при пологом входе в атмосферу Земли со скоростью большей второй космической скорости. Потенциальными источниками такого рода микробиологических объектов могут выступать некоторые небесные тела Солнечной системы. В качестве моделей спор внеземных бактерий, как и в первой серии численных экспериментов, рассматривались сферические микрочастицы из углерода (графита) радиусом 0.5, 1, 2 и 3 мкм. Расчеты проводились для конкретного случая, когда в начальный момент $t = 0$ МБО, достигший ближайшей окрестности Земли, находится в плоскости земного экватора на высоте 400 км над земной поверхностью и движется со скоростью v_0 , которая лежит в экваториальной плоскости, равна по величине 11.20 км/с (т.е. больше второй космической скорости на высоте 400 км, равной 10.85 км/с) и составляет угол $i = 105^\circ$ с местной вертикалью. Заметим, что указанное значение угла i находится внутри узкого “коридора”, нижняя граница которого определяется условием “захвата” МБО рассматриваемых радиусов атмосферой Земли, а верхняя граница — необходимостью реализации таких режимов входа МБО в атмосферу, при которых максимальные температуры аэродинамического нагрева МБО, по крайней мере для некоторых из рассматриваемых значений радиуса, не превышают критического значения $T_{\text{кр}}$ для спор внеземных бактерий, которое, как и для спор земных бактерий, полагалось равным 250°C . Расчеты проводились для различных значений долготы начальной точки λ . Предполагалось, что во всех рассмотренных случаях начальный момент соответствует моменту 12:00 UT 18.V.1996.

В качестве примера на рис. 3 и 4 приведены результаты расчета зависимостей от времени температур МБО с рассматриваемыми значениями радиуса для двух конкретных значений долготы начальной точки: $\lambda = 0^\circ$ и $\lambda = 173^\circ$. Отметим, что в случае $\lambda = 0^\circ$ начальная точка освещена Солнцем, а при $\lambda = 173^\circ$ находится в тени Земли.

Сравнение результатов расчета временного хода температур МБО в случаях $\lambda = 0^\circ$ и $\lambda = 173^\circ$ показывает, что для одинаковых значений радиуса МБО имеет место совпадение временных моментов $t_{\max}$, в которые достигаются локальные максимумы температуры МБО, обусловленные их аэродинамическим нагревом в верхней атмосфере, причем

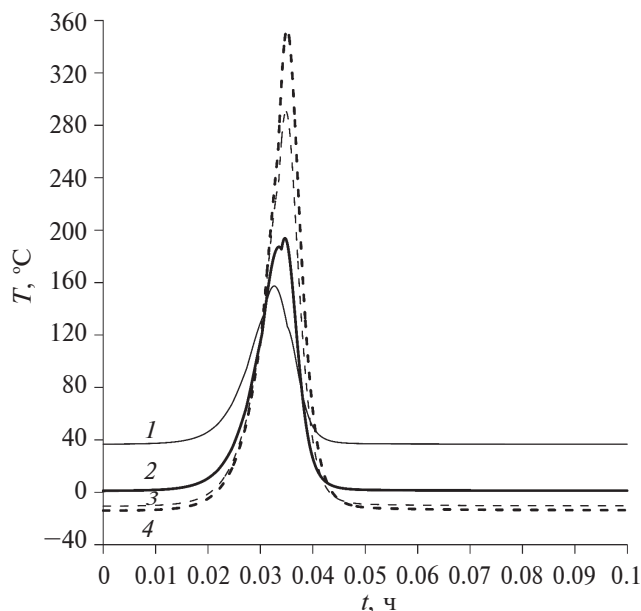


Рис. 3. Временной ход температуры МБО различного радиуса для значения долготы точки отделения $\lambda = 0^\circ$ при скорости 11.20 км/с: кривая 1 – 0.5 мкм; 2 – 1 мкм; 3 – 2 мкм; 4 – 3 мкм.

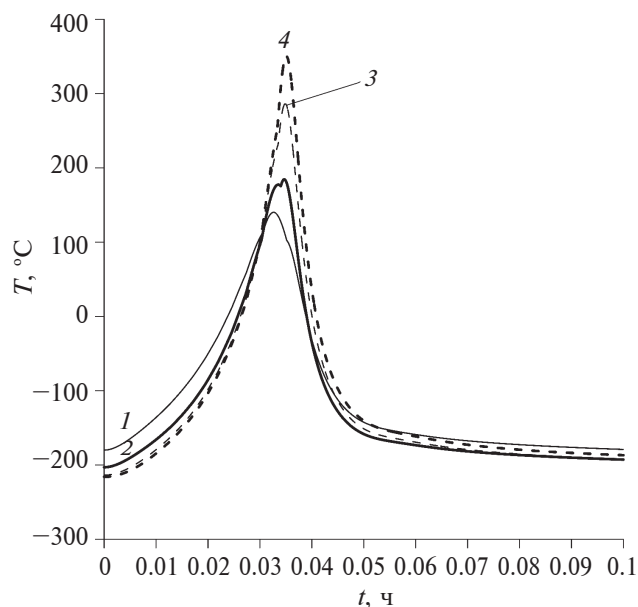


Рис. 4. Временной ход температуры МБО различного радиуса для значения долготы точки отделения $\lambda = 173^\circ$ при скорости 11.20 км/с: кривая 1 – 0.5 мкм; 2 – 1 мкм; 3 – 2 мкм; 4 – 3 мкм.

значения $t_{\max}$ для МБО различного радиуса находятся в узком промежутке от 1.96 до 2.11 мин. Как видно из данных рис. 3 и 4, наибольшую величину имеют температуры в максимумах, которые достигаются в случае $\lambda = 0^\circ$, когда начальная точка освещена Солнцем. Указанные температуры для МБО радиусами 0.5, 1, 2 и 3 мкм равны соответственно 157°C, 194°C, 291°C и 353°C. В тоже время, наименьшую величину имеют температуры в максимумах, которые достигаются в случае $\lambda = 173^\circ$, когда начальная точка находится в тени. Указанные температуры для МБО радиусами 0.5, 1, 2 и 3 мкм равны соответственно 140°C, 185°C, 286°C и 350°C.

Результаты расчетов временного хода температур МБО с заданными значениями радиуса для других значений долготы начальной точки λ показывают, что положение моментов достижения локальных максимумов температуры на временной оси в общем случае не зависит от λ . Одинаковыми являются и значения температуры в максимумах, достигаемых в случаях, когда начальная точка освещена Солнцем, а также в случаях, когда начальная точка находится в тени Земли.

Как следует из вышеизложенного, в рассматриваемом примере максимальные температуры аэродинамического нагрева модельных МБО из углерода радиусами 0.5 и 1 мкм равны соответственно 157°C и 194°C. Указанные температуры меньше критической температуры 250°C, и, таким образом, имеются основания предполагать, что споры не крупных внеземных бактерий размером $\lesssim 1$ мкм

способны выдержать аэродинамический нагрев при входе в атмосферу Земли со скоростью большей второй космической. В тоже время **минимальные** температуры аэродинамического нагрева модельных МБО из углерода радиусами 2 и 3 мкм, равные соответственно 286°C и 350°C оказываются большими критической температуры 250°C, и, следовательно, способность выживания спор внеземных бактерий размером $\gtrsim 2$ мкм при входе в атмосферу Земли со скоростью большей второй космической является сомнительной.

Наконец, третья серия численных экспериментов была направлена на выяснение способности спор гипотетических внеземных бактерий, приходящих из межзвездного пространства, выдерживать аэродинамический нагрев при пологом входе в атмосферу Земли со скоростью большей третьей космической скорости. В качестве моделей такого рода МБО, как и ранее, рассматривались сферические микрочастицы из углерода (графита) радиусом 0.5, 1, 2 и 3 мкм. Предполагалось, что в начальный момент $t = 0$ МБО находится в плоскости земного экватора на высоте 400 км над земной поверхностью и движется со скоростью v_0 , которая лежит в экваториальной плоскости, равна по величине 16.65 км/с (т.е. больше третьей космической скорости на высоте 400 км, равной 16.43 км/с) и составляет угол $i = 105^\circ$ с местной вертикалью. Расчеты проводились для различных значений долготы начальной точки λ . Предполагалось, что во всех рассмотренных случаях начальный момент соответствует моменту 12:00 UT 18.V.1996.

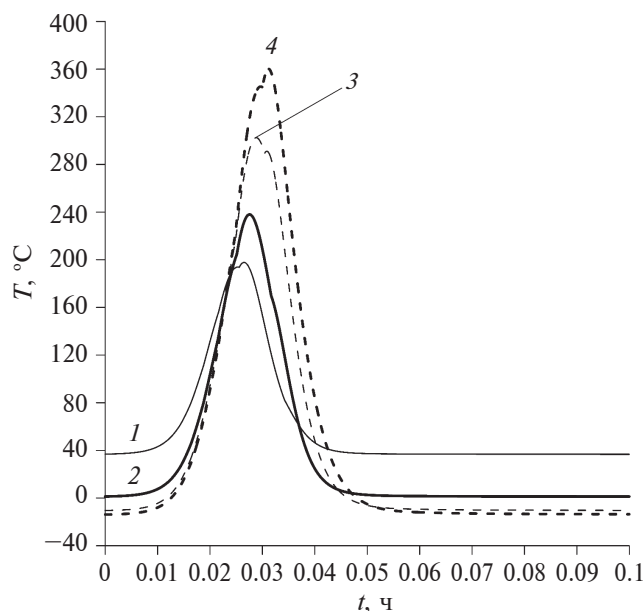


Рис. 5. Временной ход температуры МБО различного радиуса для значения долготы точки отделения $\lambda = 0^\circ$ при скорости 16.65 км/с: кривая 1 – 0.5 мкм; 2 – 1 мкм; 3 – 2 мкм; 4 – 3 мкм.

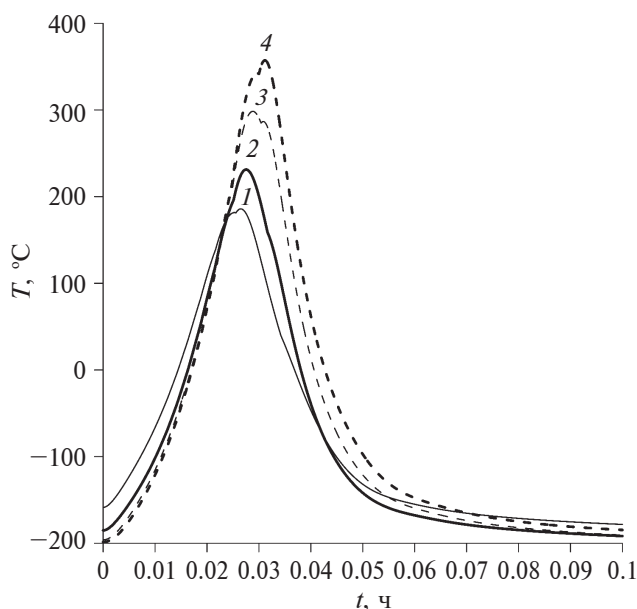


Рис. 6. Временной ход температуры МБО различного радиуса для значения долготы точки отделения $\lambda = 173^\circ$ при скорости 16.65 км/с: кривая 1 – 0.5 мкм; 2 – 1 мкм; 3 – 2 мкм; 4 – 3 мкм.

В качестве примера на рис. 5 и 6 приведены результаты расчета зависимостей от времени температур МБО с рассматриваемыми значениями радиуса для двух значений долготы начальной точки: $\lambda = 0^\circ$ (начальная точка освещена Солнцем) и $\lambda = 173^\circ$ (начальная точка в тени).

Сравнение результатов расчета временного хода температур МБО в случаях $\lambda = 0^\circ$ и $\lambda = 173^\circ$ показывает, что для одинаковых значений радиуса МБО имеет место совпадение временных моментов $t_{\max}$, в которые достигаются локальные максимумы температуры МБО, обусловленные их аэродинамическим нагревом в верхней атмосфере, причем значения $t_{\max}$ для МБО различного радиуса находятся в узком промежутке от 1.59 до 1.87 мин. Как видно из данных рис. 5 и 6, наибольшую величину имеют температуры в максимумах, которые достигаются в случае $\lambda = 0^\circ$. Указанные температуры для МБО радиусами 0.5, 1, 2 и 3 мкм равны соответственно 198°C, 238°C, 302°C и 360°C. В то же время, наименьшую величину имеют температуры в максимумах, которые достигаются в случае $\lambda = 173^\circ$, когда начальная точка находится в тени. Указанные температуры для МБО радиусами 0.5, 1, 2 и 3 мкм равны соответственно 186°C, 231°C, 298°C и 357°C.

Результаты расчетов временного хода температур МБО с заданными значениями радиуса для других значений долготы начальной точки λ показывают, что положение моментов достижения локальных максимумов температуры на временной оси в общем случае не зависит от λ . Одинаковыми являются и значения температуры в максимумах,

достигаемых в случаях, когда начальная точка освещена Солнцем, а также в случаях, когда начальная точка находится в тени Земли.

Как следует из вышеизложенного, в рассматриваемом случае **максимальные** температуры аэродинамического нагрева модельных МБО из углерода радиусами 0.5 и 1 мкм равны соответственно 198°C и 238°C. Указанные температуры меньше критической температуры 250°C, и, таким образом, имеются основания предполагать, что споры не крупных внеземных бактерий размером $\lesssim 1$ мкм способны выдержать аэродинамический нагрев при входе в атмосферу Земли со скоростью большей третьей космической. В то же время даже **минимальные** температуры аэродинамического нагрева модельных МБО из углерода радиусами 2 и 3 мкм, равные соответственно 298°C и 357°C оказываются большими критической температуры 250°C, и, следовательно, способность выживания спор внеземных бактерий размером $\gtrsim 2$ мкм при входе в атмосферу Земли со скоростью большей третьей космической является сомнительной.

ВЫВОДЫ

1. Разработана и реализована в расчетной программе математическая модель, описывающая движение в ОКП и аэродинамический нагрев при входе в атмосферу сферических микрочастиц из углерода (графита) радиусами от 0.5 до 3 мкм, моделирующих споры бактерий. Модель основана на совместном численном решении уравнений

движения в ОКП указанного модельного микробиологического объекта (МБО) и уравнения теплового баланса, описывающего изменение внутренней энергии МБО.

2. На основе результатов численных экспериментов показано, что максимальные температуры аэродинамического нагрева модельных МБО, отделяющихся от поверхности крупного низкоорбитального объекта искусственного происхождения, движущегося по низкой круговой орбите высотой 400 км, оказываются *существенно* меньшими предельной температуры выживания спор земных бактерий $T_{кр} = 250^\circ\text{C}$ при импульсном нагреве. Таким образом, имеются основания предполагать, что многие из спор земных бактерий, выносимых в ближний космос на не стерилизованных поверхностях космических аппаратов и последних ступеней ракет-носителей и выдерживающих воздействие факторов космической среды, в конце концов возвращаются на Землю, сохраняя свою жизнеспособность.

3. На основе результатов численных экспериментов определены максимальные температуры аэродинамического нагрева сферических микрочастиц из углерода (графита) с радиусами 0.5, 1, 2 и 3 мкм, рассматриваемых как модели спор гипотетических бактерий внеземного происхождения, входящих в атмосферу со скоростями: а) большими второй космической скорости, б) большими третьей космической скорости. В первом случае фактически моделируется нагрев при входе в атмосферу Земли спор бактерий, рождающихся в пределах Солнечной системы, а, во втором, — приходящих из межзвездного пространства. В обоих случаях предполагалось, что модельный МБО в начальный момент находится в точке экваториальной плоскости на высоте 400 км над поверхностью Земли и движется со скоростью, вектор которой лежит в плоскости земного экватора и составляет угол 105° с местной вертикалью. Как следует из полученных расчетных данных, в указанных случаях максимальные температуры аэродинамического нагрева модельных МБО радиусами 0.5 и 1 мкм оказываются меньшими предельной температуры выживания спор земных бактерий $T_{кр} = 250^\circ\text{C}$. В тоже время даже минимальные температуры аэродинамического нагрева более крупных модельных МБО радиусами 2 и 3 мкм оказываются большими $T_{кр}$. Таким образом, если споры гипотетических бактерий внеземного происхождения обладают устойчивостью к импульсному нагреву близкой к термической устойчивости спор земных бактерий, полученный результат дает основание для предположения о том, что споры гипотетических внеземных бактерий размером $\lesssim 1$ мкм способны выдерживать аэродинамический нагрев при входе в атмосферу Земли со скоростями большими как второй, так и третьей космической скорости.

Этот результат является определенным аргументом в пользу известной теории панспермии.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23–21–00038, <https://rscf.ru/project/23-21-00038/>.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесников Е. К., Чернов С. В. О времени существования микрочастиц на низких круговых околоземных орбитах // Косм. исслед. 1997. Т. 35. № 2. С. 221–222.
2. Цыганков О. С., Гребенникова Т. В., Дешевая Е. А. и др. Исследования мелкодисперсной среды на внешней поверхности международной космической станции в эксперименте “Тест”: обнаружены жизнеспособные микробиологические объекты // Косм. техника и технологии. 2015. № 1(8). С. 32–41.
3. Баранов В. М., Поликарпов Н. А., Свистунова Ю. В. и др. Основные результаты эксперимента “Биориск” на Международной космической станции // Авиакосм. и эколог. медицина. 2006. Т. 40. № 3. С. 3–9.
4. Hoyle F., Wickramasinghe N. C., Al-Mufti S. The Viability with Respect to Temperature of Micro-Organisms Incident on The Earth’s Atmosphere // Astrophysics and Space Science. 1999. V. 268. P. 45–50. <https://doi.org/10.1023/A:1002484300533>.
5. Колесников Е. К. Динамические модели процессов распространения потоков заряженных частиц в космической плазме: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. СПб., 1998. 481 с.
6. Burns J. A., Philippe L. L., Soter S. Radiation Forces on Small Particles in the Solar System // Icarus. 1979. V. 40. P. 1–48.
7. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986.
8. Бронштэн В. А. Физика метеорных явлений. М.: Наука. 1981.
9. Picone J. M., Hedin A. E., Drob D. P. et al. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // J. Geophysical Research. 2002. V. 107. No. A12. P. SIA 15–1–SIA 15–16.
10. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. и др. Физические величины: справ. / под. ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат. 1991.

11. Мартыненко Ю.В., Огнев Л.И. Тепловое излучение наночастиц // Журн. техн. физики. 2005. Т. 75. Вып. 11. С. 130–132.
12. Свойства элементов: в 2-х ч. Ч. 1. Физические свойства: справ. 2-е изд. М.: Металлургия, 1976.
13. Колесников Е.К., Чернов С.В. Времена жизни техногенных микрочастиц, инжектируемых в околоземное космическое пространство на геостационарной орбите // Косм. исслед. 2022. Т. 60. № 4. С. 307–314. DOI: 10.31857/S0023420622040057
14. Klumov B. A., Popel S. I., Bingham R. Dust particle charging and formation of dust structures in the upper atmosphere // Pis'ma v ZhETF. 2000. V. 72. Iss. 7. P. 524–529.
15. Клумов Б.А., Морфилл Г.Е., Попель С.И. Формирование структур в запыленной ионосфере // Журн. эксперим. и теорет. физики. 2005. Т. 127. Вып. 1. С. 171–185.
16. Gadsden M., Schroder W. Noctilucent clouds. Springer-Verlag. Berlin. 1989.
17. Базикян Э.А., Волчкова Л.В., Лукина Г.И. и др. Особенности дезинфекции и стерилизации в стоматологии: учеб. пособие. М.: ГЭОТАР-Медиа. 2016.