

Капля в космосе

Когда-то я придумал задачу для турнира юных физиков, но она так и «не сыграла»:

Капля воды объёмом 10 см^3 при температуре 300 К выпущена космонавтом из шприца во время выхода из космической орбитальной станции в открытый космос. Что будет происходить с каплей? Как долго она будет жить, летая рядом со станцией?

Эти вопросы интересовали меня давно, но космонавты (например, Александр Серебров), проводя физические эксперименты и записывая их на видео, предпочитали «играть» с каплями воды, находясь на борту станции, а не снаружи. Раз эксперимент отсутствует, придется включить воображение и «предсказать», *что было бы, если бы...*

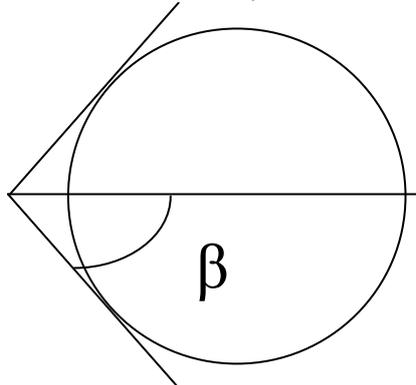
Предположим, что вода, из которой состоит капля, была тщательно очищена от пузырьков воздуха и прочих примесей, на которых возможно образование пузырьков пара. То есть капля в момент выпуска в вакуум представляет собой нагретую сплошную жидкость и не разваливается на мелкие капельки. Испарение молекул с её поверхности должно привести к быстрому снижению температуры капли. Понятно, что молекулы, покидающие каплю, обратно уже не возвращаются.

Капля большую часть времени оборота вокруг Земли, длящегося примерно 93 мин, облучается Солнцем и Землёй (56 мин), а в остальное время (37 мин) облучается только Землёй. Такая разница времён обусловлена тем, что космическая станция, а вместе с ней и наша капля летают над поверхностью Земли на высоте примерно 400 км. Земля излучает в инфракрасном диапазоне длин волн, т.е. в основном «греет, а не светит», да и греет-то не очень жарко. За много столетий установился баланс между поступающей на Землю от Солнца энергией излучения и энергией, которую наша планета излучает в Космос.

Альбедо Земли в среднем равно $\alpha = 35\%$. Плотность потока излучения от Солнца на расстоянии, равном расстоянию до Земли, равна примерно $W_0 = 1,36 \text{ кВт/м}^2$. Этим двум величинам с учетом вращения Земли соответствует средняя радиационная температура Земли:

$$W_0(1 - \alpha)\pi R^2 = 4\pi R^2\sigma T_3^4 \Rightarrow T_3 = \sqrt[4]{\frac{W_0(1 - \alpha)}{4\sigma}} \approx 250 \text{ К}$$

С одной стороны от капли всегда находится Земля с температурой 250 К , а с другой стороны - «холодный» Космос. На рисунке окружность изображает Землю, а проведённые из точки, где находится капля, касательные образуют конус с углом при вершине 2β .



При высоте полёта станции 400 км угол β равен примерно 70° . Это означает, что из всего сферического (телесного) угла 4π рад Земля видна с капли только в телесном угле $2\pi(1 - \cos\beta) \approx 4,16$ стеррад.

В среднем по времени на единицу площади поверхности капли падает мощность излучения Земли

$$W_3 = \frac{W_0(1 - \alpha)}{4} \cdot \frac{(1 - \cos\beta)}{2} \approx 73 \text{ Вт/м}^2.$$

Если бы на месте капли находился «неиспаряющийся» черный шарик, и он все время освещался бы только Землёй, то его установившуюся температуру $T_{ш1}$ можно найти из соотношения:

$$2\pi(1 - \cos\beta) R^2 \sigma T_3^4 = 4\pi R^2 \sigma T_{ш1}^4 \Rightarrow$$

$$T_{ш1} = \sqrt[4]{\frac{W_0(1 - \alpha)}{4\sigma} \times \frac{(1 - \cos\beta)}{2}} \approx 190\text{K}$$

При учете дополнительного подогрева капли за счёт излучения Солнца нужно принять во внимание, что видимый свет водой и льдом практически не поглощается. Хорошо поглощается водой только инфракрасная часть спектра излучения Солнца ($\lambda > 1,5$ мкм). На неё приходится примерно $\gamma = 10\%$ общего потока излучения. Теперь в среднем на единицу площади капли падает мощность излучения $W_{з+с} = 110 \text{ Вт/м}^2$. Отсюда для «неиспаряющейся» капли (или шарика) получим:

$$4\pi R^2 \sigma T_{ш2}^4 = W_0(1 - \alpha) \pi R^2 \frac{(1 - \cos\beta)}{2} + W_0 \gamma \pi R^2 \Rightarrow$$

$$T_{ш2} = \sqrt[4]{\frac{W_0}{4\sigma} \left[\gamma + (1 - \alpha) \frac{(1 - \cos\beta)}{2} \right]} \approx 208\text{K}$$

Внешнее давление отсутствует, т.к. как капля находится в вакууме. Нулевое давление, очевидно, меньше давления пара в тройной точке лёд-вода-пар (611 Па), поэтому состоянием капли, близким к «равновесному», пока она не испарилась полностью, будет состояние льда¹. Температуры 190 К и 208 К - это завышенные оценки, т.к. нами совсем не учтён (пока) механизм потерь теплоты, связанный с испарением молекул с поверхности капли.

Предположим, что капля остается шарообразной, хотя и вращается вокруг своей оси, перпендикулярной плоскости, в которой лежит орбита Земли, делая, скажем, один оборот за несколько секунд. Это предположение позволит не рассматривать неравномерный нагрев капли с разных сторон и считать, что она освещается в среднем равномерно по площади поверхности.

Итак, намечились следующие этапы, которые характеризуют «жизнь» капли:

1. Капля остывает от начальной температуры 300 К и превращается в лёд.
2. Лёд продолжает остывать и приобретает некую среднюю температуру.
3. Температура капли-ледышки колеблется в течение каждого оборота вокруг Земли от самой высокой в конце каждого временного промежутка, когда капля освещена Солнцем, до самой низкой в конце каждого временного промежутка пребывания капли в тени Земли.
4. После нескольких оборотов вокруг Земли капля полностью испаряется.

Нужно оценить время остывания, полное время жизни капли, а также указанные максимумы и минимумы температуры кусочка льда, в который превратится капля воды. Для некоторых величин, характеризующих каплю, можно использовать точные справочные данные, а другие величины будут выбираться из некоторых соображений, которые хотелось бы назвать «разумными».

¹ Однако мы всё равно будем называть этот кусок льда «каплей».

В табл. 1 приведены данные для воды, взятые из справочника «Физические величины».

Таблица 1

Зависимость давления насыщенных паров воды от температуры												
143	152	161	171	183	197	212	231	253	281	319	373	T, K
-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	$\lg(p/p_{\text{атм}})$

Количество молекул, испаряющихся с единицы поверхности за единицу времени, можно оценить, зная давление насыщенного пара данного вещества при выбранной температуре. Давление p в соответствии с основным уравнением молекулярно-кинетической теории равно nkT . Количество молекул, покидающих за единицу времени поверхность тела, граничащую с насыщенным паром, связано прямо пропорциональной зависимостью с числом ударов молекул насыщенного пара о поверхность вещества за это же время. Оно во много раз меньше числа ударов о поверхность. Это связано с тем, что не все молекулы, ударившись о поверхность воды или льда, «прилипают» к ней - большинство упруго отскакивают. При динамическом равновесии, соответствующем существованию над поверхностью конденсированного вещества насыщенного пара, количества молекул, прилипающих к поверхности и покидающих ее, в среднем по времени одинаковы. Предположим, что только каждая сотая молекула, ударившаяся о поверхность, «прилипает» к ней ².

Каждая испарившаяся с поверхности молекула «уносит» с собой энергию, которая потребовалась ей для отрыва от соседок. Над поверхностью нашей капли нет атмосферы, поэтому пар не совершает работы при расширении, в отличие от ситуации, имеющей место в атмосфере. Молярная теплота парообразования воды (и льда тоже) без работы, связанной с расширением, равна примерно $\beta = 3,8 \cdot 10^4$ Дж/моль. С единицы поверхности капли каждую секунду уносится количество теплоты Q , которое можно приблизительно оценить с помощью формулы:

$$Q \approx \frac{1}{100} \left(\frac{\beta}{A} \right) \frac{P}{kT} \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \frac{P\beta\sqrt{3}}{100\sqrt{RT\mu}} \approx 1,6 \cdot 10^3 \frac{P}{\sqrt{T}} \text{ (СИ)}$$

В этой формуле A – это число Авогадро.

В табл. 2 приведены расчётные данные для потерь количества теплоты, связанных с испарением и приходящихся на единицу площади.

Таблица 2

Зависимость удельных потерь количества теплоты, связанных с испарением воды, от температуры (с учетом 99% «отскоков»).							
143	152	161	171	183	197	212	$T (K)$
0,00013	0,0013	0,013	0,123	1,20	11,50	110	$W_{\text{пар}} \text{ (Вт/м}^2\text{)}$

Нужно найти такие температуры T_1 и T_2 льда, при которых суммарные тепловые потери, связанные с излучением и испарением молекул, соответствовали бы двум значениям мощности, приходящейся на единицу площади поверхности: 73 Вт/м^2 и 110 Вт/м^2 .

$$W_{\text{пар}} + \sigma T_1^4 = W_3$$

$$W_{\text{пар}} + \sigma T_2^4 = W_{3+C}$$

Видно из таблицы, что температура T_1 должна быть около 188 К, а температура T_2 – около 200 К. При этом большая часть тепловых потерь обеспечивается механизмом излучения ³

² Правильную величину этой доли «прилипающих» молекул может дать эксперимент. Хорошо бы кто-нибудь из читателей его сделал и сообщил бы о результатах.

³ Если бы мы считали, что прилипают не 1% молекул, а 10%, то соответствующие температуры T_1 и T_2 были бы ниже, а вклады разных механизмов потерь были бы примерно одинаковы. А если бы мы считали, что при

Итак, находясь в тени Земли в состоянии с установившейся температурой 188 К, капля (ледышка) теряет молекулы с поверхности, и на это тратится примерно 3 Вт/м^2 , а будучи освещенной Солнцем (тоже при установившейся температуре 200 К), она тратит примерно 16 Вт/м^2 на испарение молекул. При этом за счёт механизма излучения тратится 70 Вт/м^2 и 94 Вт/м^2 соответственно.

Характерные линейные размеры капли массой $M_{\text{л}} = 10 \text{ г}$ сразу после её выпуска в Космос $0,02 \text{ м}$. Теплоемкость 1 г льда равна $2,1 \text{ Дж/К}$. Поток излучения, падающий на ледышку, имеет порядок величины $P_{\text{т}} = 0,08 \text{ Вт}$ (в тени) и $P_{\text{с}} = 0,12 \text{ Вт}$ (на Солнце). Характерное время установления температуры ледышки массой 10 г при переходе из тени на свет и обратно равно:

$$t = \frac{T_2 - T_1}{P_{\text{с}} - P_{\text{т}}} C_{\text{л}} M_{\text{л}} \approx 6 \cdot 10^3 \text{ с.}$$

Это время сравнимо с суммарным временем пребывания ледышки в тени и на Солнце и означает, что рассчитанные нами температуры для «установившихся» режимов на начальном этапе «жизни» капли не достигаются. Только когда масса капли за счёт испарения уменьшится до $0,1 \text{ г}$, амплитуда колебаний температуры достигнет максимума и приблизится к расчётной величине $10\text{-}12$ градусов.

Вывод таков: в течение большей части «жизни» капли ее температура колеблется от 195 К до 198 К . Средней температуре соответствует мощность тепловых потерь, связанных с испарением молекул, примерно 10 Вт/м^2 . При этом радиус капли уменьшается со скоростью примерно 5 нм/с . После остывания капли и превращения ее в лёд масса капли изменилась несущественно. Отсюда можно оценить время «жизни» капли:

$$T = 1,4 \text{ см} / (5 \text{ нм/с}) = 2,8 \times 10^6 \text{ с. Это примерно месяц}^4.$$

От жидкого состояния при $T = 300 \text{ К}$ до температуры 273 К капля остыла гораздо скорее, чем за месяц. А потом она превращалась в лёд, а потом еще лёд остывал за счет испарения и излучения до температуры 200 К . Все эти этапы я предлагаю заинтересовавшимся читателям разобрать самостоятельно. А космонавты, если тоже заинтересуются таким простым экспериментом, могли бы его провести и показать нам, например, серию снимков постепенно уменьшающейся капли-ледышки, сделанных, скажем через сутки через окно иллюминатора.

ударах все 100% молекул прилипают к поверхности, то температуры были бы еще ниже, а главенствующим механизмом тепловых потерь стал бы механизм, связанный с испарением молекул.

⁴ Однажды в телевизионном сообщении о работе некоторого оборудования на космической станции говорили, что конструкция (может быть, это была антенна) не сумела развернуться. «Специалисты предположили, что причиной была замерзшая вода, попавшая в какой-то шарнир.» Понятно, что космонавты, вылетевшие на недельку на орбиту, ожидать целый месяц, пока вода испарится, не могли.