

УДК 530.12:531.51+57

## О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УСТРОЙСТВ ТИПА ЦЕНТРИФУГ В УСЛОВИЯХ ГИПОГРАВИТАЦИИ НА КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

А. И. Волегов

*Обсуждается вопрос о целесообразности использования больших вращающихся наклонных платформ для стационарного пребывания на космических объектах в условиях гипогравитации, в частности, на Луне и Марсе. Представлены соответствующие расчеты. Ключевые слова: вращающаяся платформа, гравитация, ускорение, поверхность базирования.*

Освоение космоса связано с работой в условиях невесомости и гипогравитации. Это влечет патологические изменения в физиологическом состоянии организма. К ним, в частности, относятся: перемещение значительного объема крови от нижних частей тела к верхним, атрофия мышечной ткани, хрупкость костей, морфофункциональные изменения нервной системы, особенно в центральных её отделах, вестибулярные расстройства и т. д. Ввиду этого с самого начала реализации идеи космических полетов возникла проблема профилактики таких изменений в организме, обусловленных пребыванием в таких условиях. Условия гипогравитации присутствуют на космических объектах, масса которых меньше земной.

В опубликованных статьях [1 – 3 и др.] обсуждался вопрос о целесообразности использования с целью создания искусственной силы тяжести центрифуг. Над этой проблемой работают коллективы. Однако использование центрифуг малого, среднего и большого радиуса (величиной до 12 метров) проблемы не решает, ввиду невозможности осуществлять при этом полноценную трудовую деятельность. Весьма существенной проблемой также является и отрицательное влияние значительных угловых скоростей на здоровье. Этот вопрос довольно подробно освещен в литературе и на нем мы останавливались ранее [4].

Настоящая статья посвящена теоретическому обоснованию с физических позиций применения оптимизированного, по мнению автора, устройства типа центрифуги очень большого радиуса с учетом собственной силы тяжести космического объекта.

Есть основания полагать, что, в принципе, проблема может быть решена, при возможности соответствующего энергетического обеспечения, путем создания огромных равномерно вращающихся платформ с площадями для расселения, расположенными под определенным углом к их поверхности. На таких платформах может протекать жизнь и работа в условиях космических объектов с недостаточной естественной силой гравитации, например, на крупных астероидах, спутниках планет, Луне, Марсе. При этом на обитателей такой платформы реально постоянно будет действовать результирующий вектор центробежной силы и естественной силы тяжести, присутствующей на данном космическом объекте. Что касается энергетического обеспечения реализации таких проектов, то можно предположить, что его со временем могут обеспечить источники энергии повышенной эффективности, разработка которых осуществляется.

При вращении очень больших платформ угловая скорость, удовлетворяющая требованию компенсации недостаточности естественной силы тяжести, может быть небольшой. Это важно во избежание отрицательного влияния вращения на физиологическое состояние организма, т. к. значительные угловые скорости затрудняют нормальную жизнедеятельность организма и вызывает в нем патологические изменения, вплоть до необратимых. Однако при угловой скорости до 1 об/мин отклонений от нормы обычно не возникает [3]. Этот же литературный источник, со ссылкой также на иностранных авторов, указывает что создание в космосе постоянных поселений предусматривает создание искусственной силы тяжести. Начнем рассмотрение проблемы с гипотетического примера использования вращающихся платформ очень большого радиуса в условиях полной невесомости.

Произведем расчеты, исходя из заданной, относительно небольшой угловой скорости вращения в 0.10 рад/сек, что составляет 0.016 оборота в сек. или 0.96 об/мин  $\sim$  1 об/мин. Чтобы удовлетворить при этом требованию создания эффекта искусственной силы тяжести, равной земной, платформа должна быть определенного радиуса, который нетрудно рассчитать, исходя из формулы:

$$K = V^2/R = R^2W^2/R = RW^2 = 9.8 \text{ м/сек}^2, \quad (1)$$

где  $K$  – центробежное ускорение (оно численно равно центробежной силе в ньютонах  $9.8 \text{ Н} = 1G$ , действующей на единицу массы 1 кг в условиях земного притяжения),  $V$

– тангенциальная скорость вращения (скорость движения на данный момент точки по касательной к кривой, соответствующей радиусу  $R$ ),  $W$  – угловая скорость в радианах.

Отсюда видно, что центробежное ускорение и, следовательно, центробежная сила при заданной угловой скорости находятся в прямопропорциональной зависимости от радиуса вращения, размеры которого в современных условиях космического полета не могут быть значительными.

Из формулы 1 находим:

$$R = 9.8H/W^2 = 9.8/0.01 = 980 \text{ м} \sim 1.0 \text{ км.}$$

Сила в  $1G = 9.8 \text{ Н} \sim 10 \text{ Н}$  относится только к кромке платформы с радиусом вращения 980 м. Тогда на плоскости, расположенной по кромке платформы, перпендикулярной к радиусу вращения, и с практической точки зрения желательной замкнутой, обеспечивалась бы постоянная центробежная нагрузка (именуемая также искусственной силой тяжести) на единицу массы:

$$F_{\text{чг}} = m\omega^2 R = 1 \times 0.10^2 \times 1000 = 10.00 \text{ Н}, \quad (2)$$

$$1G = 9.8 \text{ Н} \sim 10 \text{ Н}, \quad (3)$$

$$F_{\text{чг}} = 10\text{Н}/9.8 = 1.02G, \quad (4)$$

где  $F_{\text{чг}}$  – искусственная сила тяжести или центробежная сила.

Следовательно, на такой поверхности, перпендикулярной к радиусу, а точнее, к плоскости вращения, теоретически может быть осуществлена организация постоянных станций в условиях полной невесомости. Учитывая, что центробежная сила направлена от центра, расселение может быть осуществлено на нескольких таких концентрически расположенных по отношению к центру вращения барьерах. При этом на поверхности, расположенной на расстоянии 800 метров от центра вращения, при той же угловой скорости искусственная сила тяжести составит:

$$F_{\text{чг}} = 0.10^2 \times 800 = 8.0\text{Н} = 0.82G. \quad (5)$$

Здесь и далее имеется в виду сила, действующая на 1 кг массы. На расстоянии 600 метров

$$F_{\text{цб}} = 0.10^2 \times 600 = 6.0H = 0.61G. \quad (6)$$

При расположении вращающихся платформ, например, на Луне и Марсе, следует учитывать, что эти космические объекты имеют собственную силу гравитационного притяжения, соответственно  $0.16G = 1.6H$  и  $0.38G = 3.8H$ . Будем исходить, как и ранее, из того, что результирующее воздействие должно быть равным  $1.0G \sim 10H$ , и его вектор  $F_{p.m}$  будет представлять гипотенузу прямоугольного треугольника. Эта гипотенуза должна быть перпендикулярной к площади расселения (рис.1 для условий Марса). Один из катетов этого треугольника есть соответствующая сила гравитационного притяжения  $F_{m.m}$ , направленная вертикально к поверхности планеты; другой – центробежная сила  $F_{\text{цб}}$  – параллелен плоскости вращения. Возьмем для общности, как и выше, угловую скорость, равную  $0.10 \text{ рад/сек}$ , а величину радиуса вращения также представим равным 1000 метрам. Тангенс угла наклона результирующего вектора к плоскости вращения, при горизонтальном её расположении, с учетом центробежной силы (формулы 4), для Луны составит  $0.16/1.02 = 0.157$ ; для Марса –  $0.38/1.02 = 0.373$ , что с известным приближением соответствует углам в  $9$  и  $20^\circ$ . Но этот вектор, как мы уже отметили, должен быть перпендикулярен к площади базирования астронавтов. Отсюда наклон последней поверхности платформы должен быть равен, соответственно,  $90^\circ - 9^\circ = 81^\circ$  и  $90^\circ - 20^\circ = 70^\circ$  (рис. 1).

Наша работа не относится к решению технической части решения проблемы. Однако можно отметить, что вопрос о стабильности устройства может быть решен с помощью оттяжек от той или иной периферии платформы к верхней части оси вращения при достаточной её высоте и прочности и (или) наличием опор типа подшипников или просто колес в периферийных её частях на определенных расстояниях от оси вращения, где могут быть установлены и двигатели.

Вычислить результирующую силу при данных условиях можно элементарно. Для Луны

$$F_{p.l} = \sqrt{F_{\text{цб}}^2 + F_{m.l}^2} = \sqrt{10^2 + 1.6^2} = \sqrt{102.56} = 10.13H = 1.03G, \quad (7)$$

где  $F_{\text{цб}}$  – центробежная сила, представляющая собой горизонтальную составляющую, вычисленную ранее (формулы 3 и 4);  $F_{m.l}$  – сила тяжести, обусловленная массой Луны;  $F_{p.l}$  – результирующая сила. Аналогично для Марса получим:

$$F_{p.m} = \sqrt{F_{\text{цб}}^2 + F_{m.m}^2} = \sqrt{10^2 + 3.8^2} = \sqrt{114.44} = 10.70H = 1.09G. \quad (8)$$

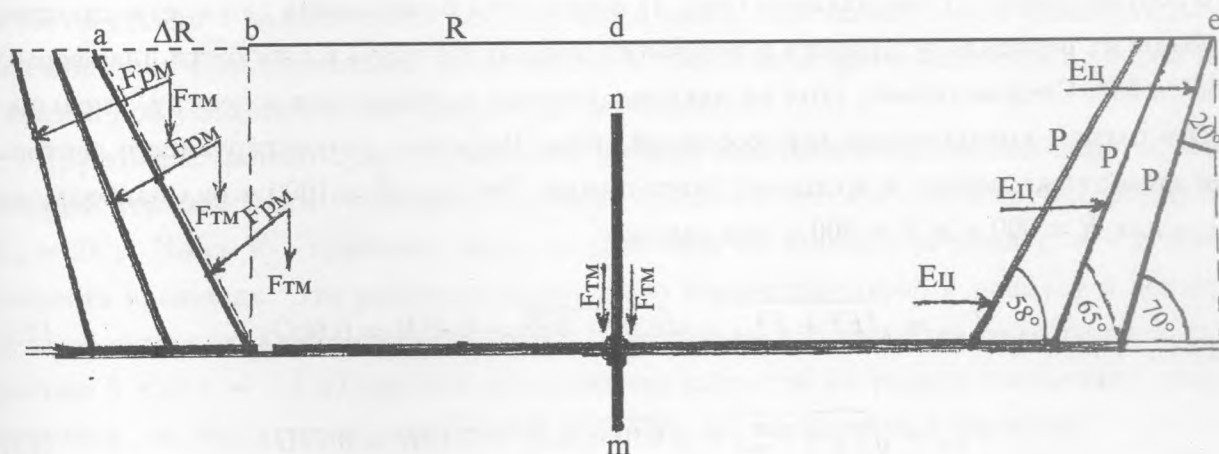


Рис. 1. Вращающаяся платформа:  $O$  – центр вращения,  $mn$  – ось вращения,  $P$  – поверхности базирования,  $F_{т.м}$  – естественная сила тяжести на Марсе,  $F_{ц}$  – центробежная сила для соответствующих расстояний,  $F_{р.м}$  – результирующий вектор сил. Величины сил выдержаны в определенном масштабе. Другие пояснения в тексте.

Следовательно, на Марсе и Луне результирующие силы различаются незначительно (значения в формулах 7 и 8) и практически равны центробежной силе при данных условиях. Это подчеркивает значение последней для компенсации гипогравитации.

При концентрическом расположении поверхностей, предназначенных для базирования астронавтов, их угол к плоскости платформы, обусловленный требованием перпендикулярности к результирующему вектору сил, как и величина последнего, зависящая от центробежной силы, будут меняться в зависимости от расстояния от оси вращения. Так для расстояний от центра в 800 и 600 метров, для Марса действительны, соответственно, значения:

$$F_{ц6} = 8H = 0.82G, \tag{9}$$

$$F_{ц6} = 6H = 0.61G. \tag{10}$$

При этом, в том же порядке, тангенсы углов естественной силы тяжести с результирующим вектором имеют значение

$$0.82/0.38 = 2.11 \text{ и } 0.61/0.38 = 1.58, \tag{11}$$

что соответствует углам наклона (рис. 1) плоскостей базирования (удовлетворяющим условию их перпендикулярности к результирующему вектору) к плоскости платформы в  $65^\circ$  и  $58^\circ$ . Следовательно, угол их наклона, по мере приближения к центру, уменьшается в связи с уменьшением центробежной силы. Величина результирующего вектора при этом также меняется в сторону уменьшения. Так для  $R = 1000$  м она наибольшая (8), а для  $R = 800$  м и  $R = 600$  м она равна:

$$F_{p.m} = \sqrt{F_{\psi}^2 + F_{m.m}^2} = \sqrt{8.0^2 + 3.8^2} = 8.86H = 0.90G, \quad (12)$$

$$F_{p.m} = \sqrt{F_{\psi}^2 + F_{m.m}^2} = \sqrt{6.0^2 + 3.8^2} = 7.10H = 0.72G. \quad (13)$$

Поэтому сила гравитационного притяжения, так как она не меняется, приобретает все большее относительное значение и в центре вращения действует только естественная сила тяжести  $F_{m.m}$  (рис. 1).

Результирующая сила тяжести в последнем варианте (13) недостаточна. Однако можно предположить, что негативное влияние этого обстоятельства на организм может быть компенсировано соответствующими упражнениями, как это происходит в условиях невесомости в космическом полете. В частности, мы полагаем, что для этой цели могут быть использованы предложенные нами тренажеры, упражнения на которых рассчитаны не только на физическую нагрузку, но и на оптимизацию действия инерционных сил [4, 5], эффект которых, как известно, может быть во многом аналогичен действию гравитационных сил. С другой стороны, концентрические зоны базирования могут быть расположены на более коротких расстояниях друг от друга, например, в 50 – 70 метров. Тогда не только в первой, но и во второй и третьей зонах базирования вопрос о специальных мероприятиях по компенсации недостаточности гравитационного воздействия может не стоять.

Рассмотренное расположение плоскостей базирования астронавтов в зависимости от расстояния от оси вращения, относительные величины и направления результирующих векторов сил тяжести для Марса представлены на рис. 1. Понятно, что расчеты, произведенные в отношении Луны, дадут, в принципе, аналогичную картину при принципиальных различиях в численных значениях.

Вместе с тем, из рисунка видно, что, перемещаясь по поверхности платформы из одной зоны в другую по направлению к центру, астронавту придется преодолевать ослабевающее сопротивление центробежной силы, подобно подъему в гору по все более пологому склону, в обратном направлении – спуску по все более крутому склону,

в соответствии с возрастанием центробежной силы. Это может иметь положительное значение для функциональной сохранности и тренировки физиологических систем организма при условиях, исключающих их перегрузку.

При этом астронавт будет подвергаться также действию инерционной силы, обусловленной кориолисовым ускорением, которое представляется в руководствах формулой  $K_{\kappa} = 2V\omega$ . Здесь  $V$  – проекция скорости движения космонавта на радиус;  $\omega$  – угловая скорость вращения. Это ускорение направлено перпендикулярно к радиусу и вектору угловой скорости. Если, например, астронавт пешком продвигается по радиусу со скоростью  $5 \text{ км/ч} \sim 1.4 \text{ м/сек}$  или проекция его скорости на радиус составляет такую величину, то, при угловой скорости  $0.1 \text{ рад/сек}$ , согласно данной формуле:

$$K_{\kappa} = 2 \times 1.4 \times 0.1 = 0.28H \sim 0.03G.$$

Отсюда при такой, приближенной к реальной скорости передвижения, при равномерном вращении центрифуги, на него будет действовать, кроме центробежной силы и естественной силы тяжести, также незначительная боковая сила, равная трем сотым земной силы тяжести. Её физиологическое значение не может быть значительным.

Ввиду наклона поверхностей базирования в направлении от оси вращения, радиус их вращения увеличивается по направлению к верхней границе. Прямо пропорционально должна увеличиваться и центробежная сила и, в зависимости от неё, результирующая сила тяжести. Формулы для Марса (8, 9, 10, 12 и 13) относятся к расстоянию от оси вращения их оснований. Следует проанализировать ситуацию для верхнего края площадей базирования.

Вычислим результирующий вектор силы тяжести для такого края поверхности базирования, радиус вращения основания которой равен 600 метров (см. рис. 1), а угол наклона их к плоскости платформы  $58^\circ \sim 60^\circ$ . Если взять ширину (высоту) плоскости базирования  $ac$  (рис. 1), например, в 30 метров, то величина удлинения радиуса:

$$\Delta R = ab = a \cos 60^\circ = 30 \times 0.5 = 15 \text{ м.}$$

Величина его соответственно верхнему краю (рис. 1):

$$R + \Delta R = 600 + 15 = 615 \text{ м.}$$

Соответствующая центробежная сила при тех же условиях:

$$0.01 \times 615 = 6.15H = 0.63G.$$

Для величины результирующего вектора силы тяжести будем иметь:

$$\sqrt{6.15^2 + 3.8^2} = \sqrt{37.82 + 14.44} = \sqrt{52.26} = 7.23H = 0.74G.$$

Отсюда видно, что различия с формулой (13) составляют  $0.02G$ , т. е. две сотых от земного силы тяжести. Это отличие на рис. 1 не представлено, как не имеющее практического значения.

Таким образом, описанное или существенно менее масштабные устройства (особенно на промежуточных этапах освоения космического объекта) могут быть использованы для: работы, длительного отдыха, тренировок и проживания астронавтов. Вообще же велика вероятность того, что на Луне и Марсе в значительной мере, как показывает практика пребывания космонавтов в условиях невесомости, можно будет временно обходиться упражнениями и другими средствами, направленными на компенсацию гравитационной недостаточности. В начальный период освоения Луны и Марса это необходимо, ввиду того, что сооружение фундаментальных устройств типа описанных вращающихся платформ, очень дорогостоящих и конструктивно сложных, требует относительно длительного времени.

При обсуждении статьи на семинаре отдела экологических и медицинских проблем ИОФ РАН участники обращали внимание на трудности реализации представленной в ней идеи, связанные с погодными условиями, особенностями атмосферы (Марс) или практическим её отсутствием (Луна), защитой от радиации и конструктивными сложностями. Вместе с тем, в развитие идеи было высказано положение (Косоев С. Г.), что альтернативой очень больших вращающихся платформ могут быть движущиеся, возможно под землей, со скоростью до 100 метров в сек. по окружности большого радиуса поездные составы с соответствующим наклоном плоскости пола. Участники семинара согласились с автором статьи, что теоретические аспекты проблемы, относящейся к достаточно удаленному будущему, должны, по возможности, решаться уже сейчас.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Григорьев А. И., Котовская И. Б., Егоров А. Д., Шипов А. А. Авиакосмическая и экологическая медицина, N 22, 22 (2003).
- [2] Котовская А. Р., Шипов А. А., Виль - Вильямс И. Ф. Медико-биологические аспекты проблемы создания искусственной силы тяжести. М., изд. "Слово", 1996.



- [3] Ш и п о в А. А. Человек в космическом полете. М., изд. "Наука"; Вашингтон, Американский инст. аэрон. и астрон., т. III, кн. 2, с. 127 - 155 (1997).
- [4] В о л е г о в А. И. О возможности компенсации невесомости и гипогравитации путем инерционных воздействий и самовоздействий. М., ИОФ РАН, Алкон, 2004.
- [5] В о л е г о в А. И. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 12, 3 (2004).

Институт общей физики  
им. А.М. Прохорова РАН

Поступила в редакцию 20 января 2006 г.