

УДК 530

## О МОДЕЛИРОВАНИИ ФАКТОРА УСКОРЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ КОМПЕНСАЦИИ ОТСУТСТВИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОРГАНИЗМ

А. И. Волегов

*Приведены принципиальные варианты простых устройств и соответствующие ориентировочные расчеты для целенаправленного воспроизведения в отсутствие гравитации ускорения, обуславливающего инерционные воздействия на организм человека за счет его же усилий. Впервые введено понятие "инерционный массаж". Предполагается определенный, компенсирующий условия невесомости, эффект.*

Пребывание организма в космическом полете в состоянии невесомости обуславливает появление патологических изменений в организме. Об этом свидетельствуют многие исследования, проведенные на животных [2, 7, 8, 13, 14 и др.], и результаты изучения изменений в организме космонавтов [1, 3, 6, 9, 11 и др.]. Применяются различные способы профилактики таких последствий, в частности, большое внимание уделяется вопросу о возможности использования с этой целью центрифуги, создающей эффект центробежного ускорения. Однако ее применение связано с существенными недостатками.

Формула, определяющая величину центробежного ускорения и, соответственно, центробежную силу, действующую на единицу массы, как известно:  $K = V^2/R = R\omega^2$ , где  $K$  – центробежное ускорение,  $V$  – тангенциальная скорость вращения (скорость движения точки на данный момент по касательной к кривой, соответствующей радиусу  $R$ ),  $\omega$  – угловая скорость. Отсюда видно, что в основном центробежное ускорение определяется угловой скоростью вращения, поскольку пропорционально ее квадрату. Вместе с тем, оно находится в прямо пропорциональной зависимости от радиуса вращения. Однако размеры последнего в современных условиях космического полета не могут быть

значительными. Сокращение же радиуса вращения, вплоть до вращения космонавта вокруг собственной продольной оси, проходящей через центр тяжести, с компенсаторным увеличением угловой скорости вращения связано с другим существенным недостатком.

Среднюю величину радиуса, определяющего в этом случае вращение центра масс, мы считаем, можно принять приблизительно равным  $7-10 \text{ см} = 0.07-0.1 \text{ м}$ . Подставив эти значения в приведенную выше формулу, мы можем получить необходимую для заданного ускорения  $K$  угловую скорость вращения в радианах. Так для ускорения  $g$ , которое обуславливает сила земного притяжения, имеем:  $\omega^2 = (2\pi n)^2 = K/R = 9.8/0.1 \sim 10/0.1 = 100$ ; где  $n$  – число оборотов в 1 сек.  $\omega = 2\pi n = 10.0$ . Для заданного условия получаем  $n = 10/6.28 = 1.60 \text{ об/сек}$ . Таким же образом находим, что для получения нагрузки в  $2g$ , необходимо совершить  $2.25 \sim 2.0 \text{ об/сек}$ ; в  $3g$ , примерно,  $2.76 \sim 3.0 \text{ об/сек}$ . Однако эта нагрузка, в зависимости от удаления тканей от оси вращения, варьирует от нулевой до значительно большей, чем  $K$ , определяемой для центра масс. Следствием является неравномерность воздействия на различные отделы каждой из физиологических систем организма, что вносит дисбаланс в регулирующие системы.

Кроме того, в условиях космического полета большую трудность представляет необходимость энергетического обеспечения работы центрифуг. При использовании электродвижущей силы может быть не безразличным для организма возникающее при этом электромагнитное поле. Свою самостоятельную проблему создают и возникающий при работе центрифуги шумовой эффект, который сам по себе отрицательно влияет на здоровье космонавтов [6].

Изложенное оправдывает поиски более удобных и более физиологичных подходов к компенсации отсутствия силы тяжести в условиях космического полета. Определенный сдвиг в этом направлении, по нашему мнению, может быть достигнут целенаправленным осуществлением упражнений, связанных с достаточно крутыми изменениями по величине и направлению вектора скорости при движениях космонавта, за счет усилий его самого.

Выполнение соответствующих упражнений обеспечивает действие сил положительного и отрицательного ускорения (или замедления), обуславливающих появление противоположно им направленных сил инерции. Последние, как можно полагать, при определенной их интенсивности, благоприятно влияют на физиологическое состояние организма [4]. Силы инерции если не идентичны, то во многом аналогичны силам гравитации. Даже небольшие вариации по величине этого фактора отражаются на функциональном состоянии физиологических систем [10]. Вопрос в том, как осуществить соответствующую

шие самовоздействия наиболее физиологичным и эффективным путем. И здесь видятся следующие варианты:

1) Устройства типа кровати-качалки или кресла-качалки, с эластичными оттяжками, расположенными по бокам и (или) спереди и сзади. Возможно в условиях невесомости для них приемлем угол в  $45^\circ$  по отношению к площади опоры. Такие оттяжки обеспечат притяжение к площади опоры, подстраховку от опрокидывания, возможность раскачивания и возвращения, как и в условиях земного притяжения, в исходное состояние.

2) Качели на одного или двух человек, закрепленные в положении, соответствующем состоянию покоя, пружинами или эластичными оттяжками с достаточным для раскачивания диапазоном растяжения. Такие оттяжки необходимы не только для обеспечения возвращения в позицию исходного состояния, но и как фактор сопротивления при условиях раскачивания.

3) Подпрыгивание из позиции приседания на пружинистой опоре. Позиция приседания при этом обеспечивает реактивный эффект при начале движения. Движения лучше координировать с помощью рук. Следовательно, должны быть специальные устройства – держалки над головой или приспособленные для этого поручни по бокам туловища (рис. 1). Участие рук в движениях будет способствовать их необходимой интенсивности, гарантирует сохранение космонавтом нужного равновесия, чувства комфортности и существенно увеличит профилактическую и терапевтическую эффективность таких сеансов.

Этот вариант, по нашему мнению, является более простым по сравнению с устройствами, обозначенными в пунктах 1-м и 2-м. К тому же соответствующее устройство занимает наименьшее пространство, а пружинистая основа способствует тушению возникающего при этом вибрационного эффекта (очень нежелательного).

Силы инерции будут действовать на все тело и основное направление их вдоль туловища, от головы к ногам и обратно. Таким образом, при этом имеет место как бы инерционный массаж тела.

Величина воспроизведенных сил ускорения и соответствующих им сил инерции, как мы полагаем, может находиться в пределах от  $g$  до  $4g$ ; где  $g$  есть принятая в космонавтике единица силы гравитации. Конечно, если физические возможности космонавта не позволят воспроизводить гравитационный фактор и на уровне  $1g$ , то он должен быть еще более снижен (что, в условиях невесомости, также может играть существенную положительную роль).

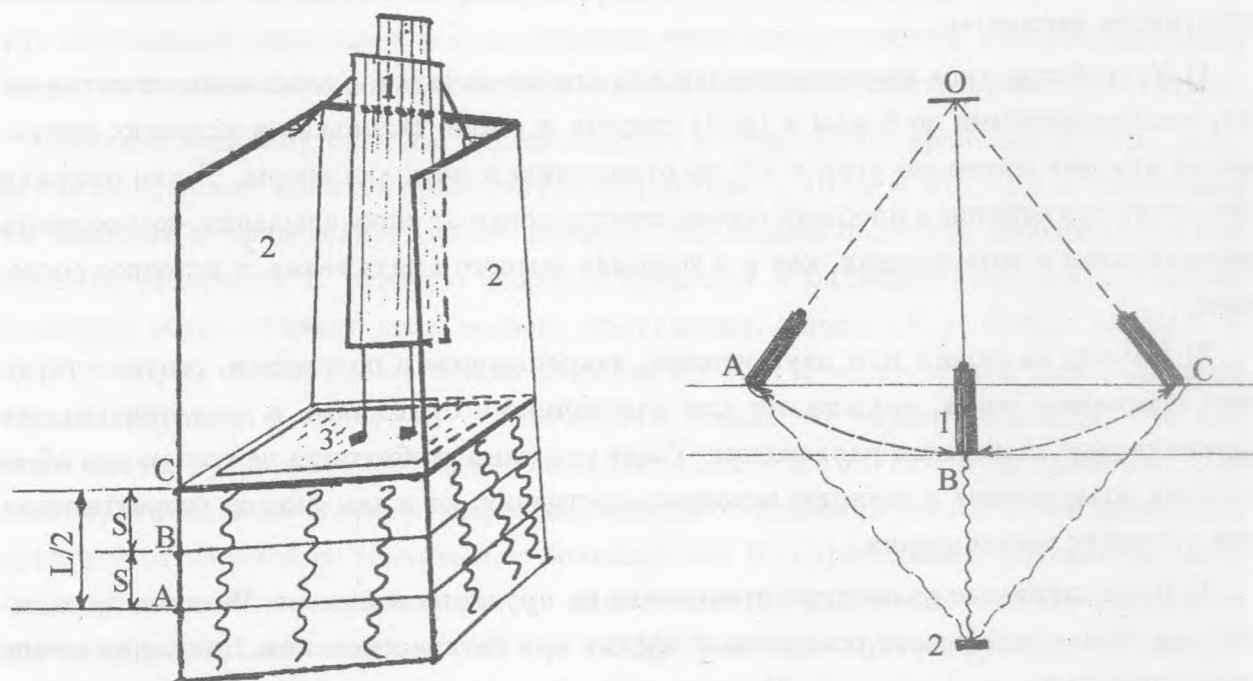


Рис. 1. Схема возможного тренажера для осуществления прямолинейных возвратно-поступательных движений космонавта. 1 – космонавт, 2 – барьер, направляющий движения пружинящей основы с космонавтом с поручнями для рук, 3 – пружинящая основа и крепления на ней для ног, A и C – соответственно, нижний и верхний предельные уровни движения; B – уровень, соответствующий состоянию покоя. Другие пояснения в тексте.

Рис. 2. Схема движений космонавта на тренажере типа качелей. 1 – космонавт в исходном положении, 2 – крепление эластичных оттяжек, O – ось шарнирного крепления качелей (перпендикулярна к плоскости рис.) B – исходное положение космонавта, A и C – точки, соответствующие крайним его положениям. Другие пояснения в тексте.

Перегрузку в  $4g$  летчики при подъеме самолета, как известно, легко переносят; перегрузка на центрифуге в  $3g$  в течение  $30$  мин, как показали наши опыты на крысах, не оказывает отрицательного влияния на состояние их гомеостаза. В опытах же на мышях C57B1/6 такая перегрузка оказывает положительное влияние на состояние их устойчивости к возникновению индуцированных опухолей [5, 16], что свидетельствует об увеличении потенциальных возможностей механизмов гомеостаза. Перегрузка той же силой в течение 2-х часов не оказывает отрицательного влияния на выживаемость мышей этой линии с возникшими очень большими опухолями (средними размерами  $4.6 \text{ см}^3$ ), то есть даже при значительном ослаблении организма [5].

Ориентировочно определить технические параметры третьего устройства и возможные режимы движений космонавта для воспроизведения сил инерции при определенных требованиях можно, исходя из известной классической формулы:

$$V_m^2 = 2KS, \quad (1)$$

где  $V_m$  – максимальная скорость;  $S$  – проходимый при этом путь, равный четверти расстояния  $L$ , преодолеваемого космонавтом за один полный цикл идеализированного в нашем случае колебательного движения, от  $A$  к  $C$  и обратно, от  $C$  к  $A$ ;  $K$  – искомое ускорение, обусловленное силами инерции.

Необходимо обратить внимание на следующее обстоятельство. Поскольку движения космонавта являются неравномерно-переменными, ускорение  $K$ , как положительное, так и отрицательное, не является постоянной величиной. Поэтому оно в наших расчетах усреднено по модулю. Однако скорость  $V$  есть для данного момента времени действительная величина, поскольку является общим результатом меняющихся ускорений, величины которых находят отражение в усредненном ускорении. Жесткость и варианты амплитуды движений пружинистой опоры должны быть отрегулированы с учетом веса космонавта так, чтобы собственная частота всей системы, по возможности, соответствовали тем расчетным требованиям, которые будут сочтены оптимальными.

С момента начала движения, экстремальными состояниями являются положения: на уровне  $A$ , на котором  $V = 0$ , а ускорение и сила инерции максимальны; на уровне  $B$ , на котором  $V$  – максимально, а ускорение и сила инерции равны нулю; на уровне  $C$ , на котором  $V = 0$ , а ускорение и сила инерции максимальны. Ускорение может совпадать или быть противоположным направлению движения (т.е. вектору скорости); а сила инерции всегда противоположна ускорению.

Возрастание скорости при движении опоры с космонавтом от уровня  $A$  к уровню  $B$  (рис. 1) и от уровня  $B$  к уровню  $A$  обусловит действие сил ускорения (замедления), направленных относительно космонавта вверх, а действие сил инерции, направленных противоположно, т.е. от головы к ногам, что будет, в частности, способствовать оттоку крови в том же направлении. Это особенно существенно, т.к. в невесомости имеет место излишний приток крови, лимфы и спинномозговой жидкости к голове. Поэтому практически важно, чтобы скорость движения наиболее круто менялась на этом отрезке пути. При движении в направлении от  $A$  к  $B$  так оно и происходит (космонавт начинает движение с подпрыгивания), а при движении в обратном направлении, от уровня  $B$  к

уровню  $A$ , не исключено содействие рук. Что касается изменений скорости на отрезке  $BC$  и обратно, то здесь, как это и желательно, изменения скорости менее крутые, так как определяются только силой трения. Кроме того, соответствующая регулировка может обеспечиваться с помощью технических средств.

Расстоянию

$$S = L/4 \quad (2)$$

соответствует время пути  $t$ , равное четверти периода  $T$ .  $L$  и  $T$  легко определяются из опыта (поэтому мы и взяли, как исходные, именно эти показатели, а не более дробные).

Отсюда

$$V = KT/4, \quad (3)$$

где  $K$  – требуемое положительное или отрицательное ускорение.

$$V_m^2 = (KT/4)^2. \quad (4)$$

Из формул (1), (2), (3) и (4) следует:  $(KT/4)^2 = 2KL/4$ . Следовательно искомое

$$K = 8L/T^2. \quad (5)$$

Выражение для периода, отражающего необходимую интенсивность движений космонавта при заданном  $K$ :

$$T^2 = 8L/K. \quad (6)$$

Определим время полного колебательного движения  $T$  для заявленных выше крайних значений и средних сил инерции в  $4g$  и  $1g$ . Будем исходить из того, что космонавт может смещаться на высоту  $30$  см, считая от предельного нижнего уровня  $A$  сжатия пружинистой основы. Тогда путь  $L$  за один полный цикл колебаний (от уровня  $A$  до уровня  $C$  и обратно до уровня  $A$ ), соответственно, будет составлять  $60$  см. Следовательно, диапазон колебаний ( $L/2$ ) в этом случае равен  $30$  см (при  $S = 15$  см), что представляется реальным. Тогда из формулы (6) имеем:  $T^2 = 8 \times 0.6/4g = 4.8/40 = 0.12$ . Отсюда  $T \sim 0.35$  сек. Находим частоту полных колебательных движений:  $n = 1/T = 2.87 \sim 3$  в 1 сек. Такая частота колебательных движений необходима космонавту, чтобы обеспечить самовоздействие средней инерционной силой в  $4g$ . При этом, исходя из усредненного требуемого ускорения  $K = 4g$ , мгновенная максимальная скорость

$V_m = 4g \times T/4 \sim 40 \times 0.35/4 = 3.5 \text{ м/сек}$ . Поскольку космонавт преодолевает путь  $S = L/4 = 0.15 \text{ м}$  за время  $t = 0.35/4 \sim 0.09 \text{ сек}$ , средняя скорость его движения  $V_{av} = 0.15/0.09 = 1.67 \text{ м/сек}$ . Априорно можно считать, что это очень большая нагрузка и вопрос о ее выполнимости решит опыт.

Те же расчеты для нагрузки на космонавта, самообеспечивающей действие сил инерции в среднем в  $1g$  (равной силе земного притяжения), дают:  $T^2 = (8 \times 0.60)/10 = 0.48$ ;  $T = 0.69 \text{ сек}$ . Частота колебательных движений  $1/0.69 \sim 1.5$  в  $1 \text{ сек}$ . Из формулы (2) для этого случая максимальная скорость  $V_m = 10 \times 0.69/4 = 1.73 \text{ м/сек}$ , что вдвое меньше, чем в первом случае.  $V_{av} = 0.15/0.17 = 0.88 \text{ м/сек}$ . Следовательно требования к интенсивности движений космонавта в этом случае существенно ниже, чем в первом случае, при заданной нагрузке в  $4g$ .

Упражнения с приседаниями космонавтов на беговой дорожке дают весьма положительный эффект. Поэтому есть основания полагать, что выполнение упражнений на описанном тренажере как в представленных режимах, так и других, может оказаться еще более полезным.

Что касается 1-го и 2-го из представленных вариантов тренажеров для осуществления инерционного массажа организма в условиях невесомости, то анализ их эффективности должен учитывать определенную специфику.

Во-первых, изменения скорости от мгновенной нулевой до мгновенной максимальной (или, напротив, от максимальной до мгновенной нулевой) при пройденном пути  $S = L/4$  зависят в этих вариантах от движения по дуге окружности (рис. 2). На уровнях  $A$  и  $C$  тангенциальное ускорение максимальное, а скорость  $V$  равна 0. На уровне  $B$  скорость максимальна, а ускорение равно 0. Из той же формулы (1):  $V_m^2 = 2K_1S = K_1L/2$ . Здесь  $K_1$  – среднее по модулю тангенциальное ускорение,  $L$  – протяженность перемещения космонавта по дуге, соответствующая одному полному колебанию;  $V_m$  – мгновенная максимальная скорость в момент движения через точку  $B$ . Ее величина вычисляется, исходя, как указано выше, из усредненного модуля ускорения:

$$V_m = K_1T/4, \quad (7)$$

$$K_1 = 2V_m^2/L. \quad (8)$$

Исходя, например, из условий  $V_m = 4 \text{ м/сек}$ ,  $R = 2 \text{ м}$  и  $L = 4 \text{ м}$ , получаем  $K_1 = 2 \times 16/4 = 8 \text{ м/сек}^2 \sim 0.8g$ . Т.е. действующая по касательной усредненная сила инерции приблизительно равна  $0.8g$ . По аналогии с формулами (5) и (6) имеем:  $T^2 = 8L/K_1 = 32/8 = 4 \text{ сек}$ ;  $T = 2 \text{ сек}$ .

В этих расчетах необходимо исходить из действительного пути перемещения  $L$ , а не просто из изменения уровня относительно начального, как для силы гравитации. Объясняется это тем, что для каждого момента времени, действует не сила земного притяжения, а сопротивление эластичных оттяжек (или пружин), подчиняющихся закону Гука  $F = k(Z' - Z'')$ , где  $Z'$  и  $Z''$  – их длина в покое и в данный момент времени движения качелей соответственно.

Во-вторых, при движении человека на качелях играет роль центробежное ускорение, вычисляемое по формуле:

$$K_2 = V_{av}^2/R = (V_m/2)^2/R = (V_m^2/4R), \quad (9)$$

где  $K_2$  – среднее центробежное ускорение;  $V_{av}$  – средняя скорость, приблизительно равная  $V_m/2$ . Вектор центробежного ускорения  $K_2$  направлен от центра по радиусу, проведенному к данной точке траектории движения.

При указанных выше значениях  $R$  и  $V_m \sim 2V_{av}$  усредненное центробежное ускорение:  $K_2 = V_{av}^2/R = 2^2/2 = 2.0 \text{ м/сек}^2 \sim 0.2g$ .

Следовательно на космонавта будет действовать результирующее ускорение  $P$ , модуль которого графически выразится диагональю прямоугольника, так как слагаемые указанных в формулах (8) и (9) векторов ускорений  $K_1$  и  $K_2$  взаимно перпендикулярны.

$$P = \sqrt{(2V_m^2/L)^2 + (V_m^2/4R)^2} = V_m^2 \sqrt{(2/L)^2 + (1/4R)^2}. \quad (10)$$

Именно эта результирующая величина составляющих ускорений приблизительно определяет интенсивность инерционного массажа при использовании тренажеров типа качелей.

Несложные расчеты показывают, что для взятых параметров  $P = 16 \times 0.52 = 8.32 \text{ м/сек} \sim 1g$ . Такую самонагрузку можно рассматривать как способную реально снизить отрицательное влияние невесомости.

Другие составляющие результирующей инерционной силы при раскачивании на качелях мы здесь не рассматриваем. К ним, в частности, относятся: кориолисова сила инерции, связанная со смещением центра масс космонавта по радиусу при его приседаниях при раскачивании (в нашем случае заведомо очень незначительная); связанная с этими движениями сила инерции, обусловленная перемещениями центра масс вдоль продольной оси тела, что сходно с рассмотренным упражнением на третьем тренажере.

Если взять 1-е устройство, типа кресел-качалок, то радиус движений центра тяжести космонавта определяется центром вращения опор. При движении туловища и



головы космонавта от вертикального положения вперед и вниз (и, следовательно, так же перемещается центр его тяжести), ноги движутся в противоположном направлении. При качании центр вращения передвигается. Нам представляется уместным при ориентировочном подсчете возможной величины воздействующей на космонавта инерционной силы, при его самораскачивании, исходить, примерно, из следующих параметров: максимальная тангенциальная скорость  $V_m = 2 \text{ м/сек}$ ; расстояние, преодолеваемое центром инерции (центром масс) космонавта за один полный цикл колебательного движения  $L = 1.0 \text{ м}$  и его расстояние от центра вращения кресла-качалки  $R = 0.5 \text{ м}$ . Тогда из формулы (10)  $P = 4 \times 2.06 = 8.24 \text{ м/сек} \sim 0.82g$ . Такой результат, по нашему мнению, можно считать значимым, и не исключено, что устройства этого типа также заслуживают повышенного внимания.

Из формулы (10) видно, что результирующее ускорение  $P$  и, следовательно, получаемое инерционное воздействие, находится в обратной зависимости от величины преодолеваемого за один цикл пути  $L$ , в обратной зависимости от  $R$  и в прямо пропорциональной зависимости от квадрата мгновенной максимальной скорости  $V_m \sim 2V_{av}$  (следовательно, зависимость эта наибольшая). Средняя тангенциальная скорость  $V_{av}$  легко определяется из эксперимента при учете  $L$  и  $T$ .

Применение устройств 1-го и, особенно, 2-го типа, ввиду относительно большого требуемого пространства, а главное, присутствия фактора раскачивания, в современных условиях космических полетов вряд ли возможно. Однако оно может иметь важное значение при организации постоянных станций, например, на Луне или Марсе, где сила гравитации в несколько раз меньше, чем на Земле.

Представленные варианты упражнений, по нашему мнению, могут дополнять компенсацию невесомости другими способами. Приведенные расчеты являются ориентировочными.

В заключение хочу выразить благодарность сотрудникам Отдела экологических и медицинских приборов ИОФ РАН и другим лицам, принявшим участие в обсуждении данной работы, причем отдельно хочу отметить докторов физико-математических наук В. А. Миляева и Е. В. Степанова, сделавших особо важные замечания.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Агуреев А. Н., Каландаров С., Сегаль Д. Э. Авиакосмическая медицина и экология, №6, 43 (1997).

- [2] Алпатов А. М., Ильин Е. А., Антипов В. В., Таирбеков М. Г. Космическая биология и авиакосмическая медицина, N 5, 26 (1989).
- [3] Алферова И. В., Турчанинова В. Ф., Голубчикова З. А., Лямин В. Р. Авиакосмическая и экологическая медицина, N 4, 20 (2002).
- [4] Волегов А. И. Медицинская консультация, N 3, 6 (1998).
- [5] Волегов А. И., Ильин Е. А. XII конференция по космической биологии и авиакосмической медицине. Материалы, М., Институт МБП РАН, 92 (2002).
- [6] Воронков Ю. И., Кузьмин М. П., Крылов В. Ю. и др. Авиакосмическая и экологическая медицина, N 1, 41 (2002).
- [7] Газенко О. Г., Демин М. Н., Панов А. Н. и др. В сб: Влияние динамических факторов космического полета на организм. М., 29 (1979).
- [8] Газенко О. Г., Генин А. М., Ильин Е. А. и др. Известия АН СССР, серия биол., с. 5.
- [9] Газенко О. Г., Шутьженко Е. Б., Григорьев А. И. и др. Космическая биология и авиакосмическая медицина, N 1, 4 (1990).
- [10] Гедерим В. В., Соколовский В. В., Горшков Э. С. и др. Биофизика, 46, N 5, 833 (2001).
- [11] Григорьев А. И., Егоров А. Д. Космическая биология и авиакосмическая медицина, N 6, 4 (1998).
- [12] Григорьев А. И., Демин Е. П., Быстрицкая А. Ф. и др. Авиационная и экологическая медицина, N 5, 3 (2002).
- [13] Серова Л. В. Космическая биология и авиакосмическая медицина, N 2, 11 (1989).
- [14] Серова Л. В. Авиакосмическая и экологическая медицина, N 4, 15 (2002).
- [15] Сеченов И. М. Рефлексы головного мозга (1863 г.), Собр. соч., 2, 1 (1908).
- [16] Volegov A. I. and Ilyin E. A. Journal of Gravitational Physiology, 9(1), 297 (2002).

Институт общей физики  
им. А. М. Прохорова РАН

Поступила в редакцию 21 июня 2004 г.  
После переработки 12 октября 2004 г.