

Центрифуга короткого радиуса (ЦКР) как гидростатическая модель земной гравитации

Пичулин В.С., Лукьянюк В.Ю., Соболева А.Ю.

В связи с появлением реальной возможности осуществления в недалеком будущем межпланетных экспедиций, для сохранения хорошей физической формы, здоровья и высокой работоспособности космонавтов необходимо быть готовыми использовать, наряду с традиционными методиками, новое профилактическое средство неблагоприятного влияния невесомости - центрифугу короткого радиуса (ЦКР), создающей искусственную гравитацию. Однако имитацию физиологических эффектов гравитации, создаваемых на ЦКР, необходимо оценить количественно, в связи с различиями природы искусственной и естественной гравитации. В статье проводится теоретическое обоснование выбора позы человека и параметров вращения для использования ЦКР в качестве адекватной гидростатической модели земной гравитации.

Ключевые слова: искусственная гравитация, центрифуга короткого радиуса, профилактика неблагоприятного влияния невесомости, гидростатическая модель, давление, гидростатика.

Keywords: artificial gravity, centrifuge of short radius, preventive maintenance of adverse influence of ghtlessness, hydrostatic model, pressure, hydrostatics.

В космическом полете (КП) с помощью усовершенствования оборудования, систем жизнеобеспечения, а также благодаря продуманной конструкции самого космического корабля для экипажа могут быть созданы необходимые условия, устраняющие или ослабляющие действие большинства неблагоприятных факторов. Пожалуй, главное исключение составляет невесомость (микрогравитация).

Невесомость — это чуждая для человека среда, адаптация к которой происходит ценой снижения устойчивости организма к привычным условиям земной гравитации. Накопленный опыт медицинского обеспечения космических полетов [1-3] убедительно свидетельствует, что длительное пребывание в условиях невесомости закономерно вызывает изменения:

- гемодинамики с развитием детренированности сердечно-сосудистой системы и венозного застоя во внутренних органах;
- двигательного аппарата и мышечной системы;
- гормонального статуса организма;
- водно-солевого обмена и систем его регуляции;
- кальциевого метаболизма и минеральной насыщенности костной ткани;
- системы крови;

- и другие неблагоприятные сдвиги.

Иными словами, пребывание в невесомости приводит к детренированности организма, снижению работоспособности и функциональных возможностей.

При этом практика космических полетов свидетельствует о возможности длительной, по крайней мере, в течение 1-1,5 лет, жизни в невесомости при условии выполнения комплекса мер профилактики неблагоприятного влияния невесомости.

В основу физической профилактики в длительных КП положено выполнение космонавтами на бортовых тренажерах тренировок, направленных на сохранение физической работоспособности, мышечной силы, статической, скоростной и общей выносливости, а также профилактика снижения минеральной насыщенности костной ткани, предупреждение нарушений деятельности сердечно-сосудистой системы и нарушений метаболизма (в частности, водно-солевого и минерального) [4-6].

Однако, несмотря на применяемые меры, явления детренированности развиваются со стороны многих органов и систем организма и сохраняются в течение 1,5-2 месяцев после возвращения на Землю, даже при применении комплекса восстановительно-лечебных мероприятий, а изменения костной ткани сохраняются до 2-3 лет [7].

Основная причина недостаточной эффективности традиционных средств профилактики заключается в том, что они не могут, с необходимой полнотой, восполнить отсутствие таких гравитационных стимулов, как:

- исчезновение гидростатического давления крови;
- весовой нагрузки на костно-мышечный аппарат и
- изменение функционирования афферентных систем.

Реальным вариантом нового профилактического средства, которое может восполнить этот пробел (совместно с традиционными средствами), следует считать периодическое создание искусственной гравитации (ИГ), путем использования на борту станции центрифуги короткого радиуса (ЦКР).

ЦКР создает ускорение в направлении «голова-ноги», что позволяет моделировать перемещение жидких сред организма, характерное для вертикальной позы человека, создавать деформации и механическое напряжение структур тела, что создает близкую к земной афферентную импульсацию. Это имеет важное значение для профилактики детренированности организма, развивающейся в условиях невесомости.

В исследованиях, проведенных ранее применительно к проблеме создания ИГ в КП, были использованы различные подходы к выбору режимов вращения ЦКР. Одним из таких подходов было создание перегрузок продольного направления (+Gz), близких по величине к Земной силе

тяжести (от 0,6 до 2,0 G на уровне стоп), имеющих большой гравитационный градиент вдоль тела человека, довольно продолжительных (от 20 до 60 минут) и часто повторяющихся (от 1 до 4 раз в сутки). Такое применение ЦКР оказывало позитивное влияние на функциональное состояние сердечно-сосудистой системы и водно-электролитный обмен организма в условиях моделированной невесомости, а также на последующую переносимость перегрузок [8-10].

Однако, имитацию физиологических эффектов гравитации, создаваемых на ЦКР, необходимо оценить количественно, в связи с различиями природы искусственной и естественной гравитации. Задача сводится к анализу адекватности замены земной силы тяжести искусственно созданной, с точки зрения воспроизведения естественного гравитационного градиента по телу и поиску адекватных режимов вращения на ЦКР и поз человека.

Целью данной работы является теоретическое обоснование выбора позы человека и параметров вращения для использования ЦКР в качестве адекватной гидростатической модели земной гравитации.

Анализ влияния ЦКР на гидростатику человека

Гидростатический компонент давления крови при вертикальной позе человека возрастает в сосудах нижней половины и уменьшается в сосудах верхней половины тела в связи с тем, что продольная ось тела человека параллельна вектору земной гравитации.

Гидростатическое давление, оказываемое столбом крови на сосудистую систему у человека в этих условиях (рис. 1.1), является постоянно действующим естественным фактором его существования [11-12].

$$p_1 = \rho gh, \quad (1)$$

где ρ – плотность человеческого организма, в рамках модели взята $1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, g – ускорение

свободного падения $9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$, h – расстояние от макушки головы до точки измерения, в наших расчетах принимает значения от 0 до 1,75 м.

Аналогичным образом можно вывести уравнение гидростатического давления в условиях вращения на ЦКР в невесомости, если человек лежит и ось вращения проходит через его макушку (рис. 1.2):

$$p_2 = \rho ah = \rho \omega^2 h^2 = \rho \left(\frac{n\pi}{30} \right)^2 h^2. \quad (2)$$

Где a – ускорение, создаваемое центрифугой при вращении со скоростью $w \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right]$, n – число оборотов в минуту.

Возможен также случай, если ось вращения ЦКР проходит на расстоянии $L(3)$ (рис. 1.3) от макушки испытуемого (благодаря этому возможно уменьшение числа оборотов), уравнение будет выглядеть следующим образом:

$$p_3 = \rho ah = \rho w^2 (h + L)h = \rho \left(\frac{n\pi}{30} \right)^2 (h + L)h. \quad (3)$$

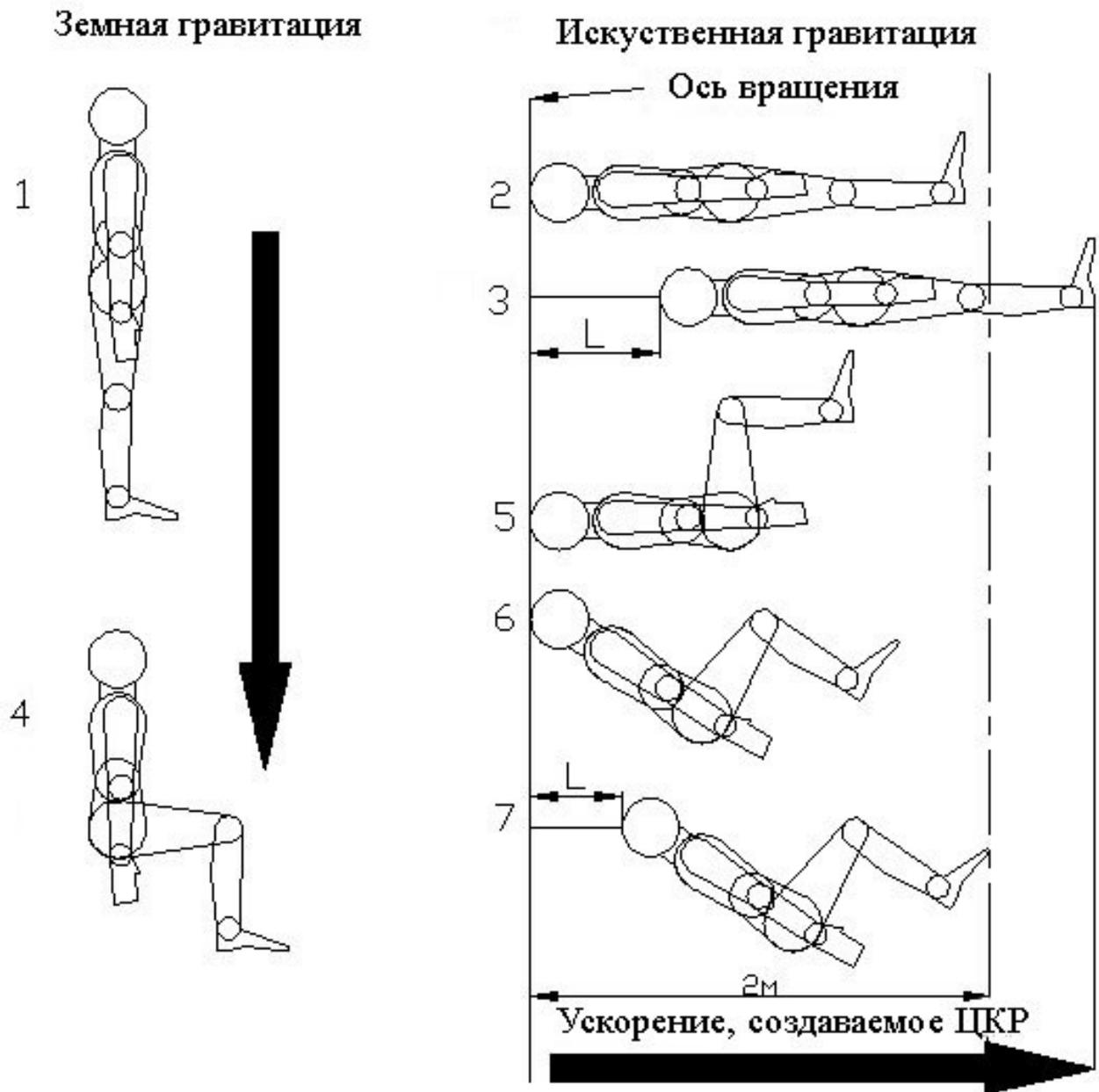


Рис. 1. Положения человека в условиях земной и искусственной гравитации.

Рассмотрим эти функции на графике (рис. 2) и проведем сравнение создаваемого гидростатического давления в условиях земного притяжения и при вращении на ЦКР в космосе. █

$p_1(h)$ - распределение гидростатического давления крови человека на Земле, стоя.

$p_2(h)$ - распределение гидростатического давления крови человека при вращении на ЦКР в условиях невесомости, в позе «лежа», ось вращения проходит через макушку.

$p_3(h)$ - распределение гидростатического давления крови человека при вращении на ЦКР в условиях невесомости, в позе «лежа», ось вращения проходит на расстоянии $L(3)$ от макушки человека.

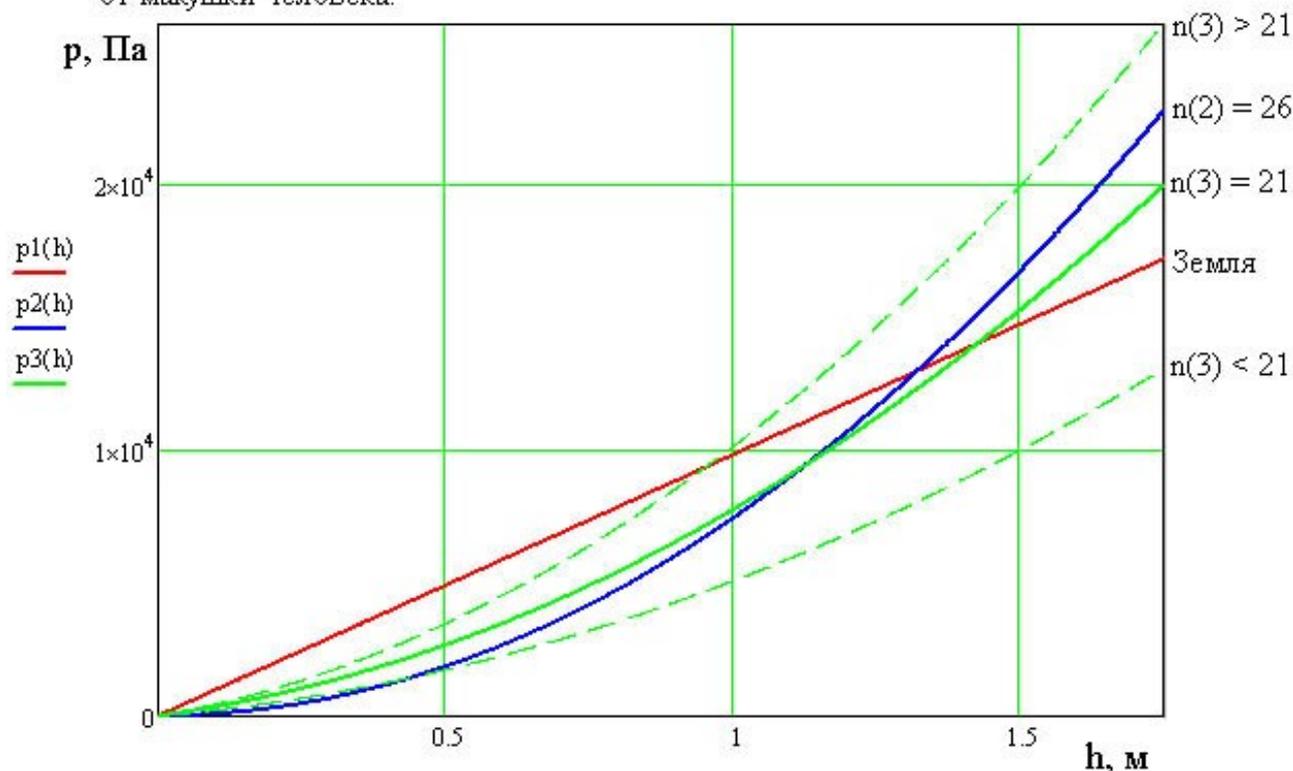


Рис. 2. Распределение гидростатического давления крови человека в условиях земной гравитации в положении «стоя» и при вращении на ЦКР «лежа».

В качестве критерия близости графиков можно использовать относительную разность:

$$\varepsilon_{2,3} = \frac{\Delta_{2,3} - \Delta_1}{\Delta_1} \cdot 100\% .$$

Где $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ - площади фигур, образованных соответственно функциями $p_1(h)$, $p_2(h)$ или $p_3(h)$.

Достигнув минимума величины ε при визуальной близости графиков на уровне стоп человека, можно вычислить оптимальное число оборотов вращения центрифуги.

Как видно из графиков, представленных на рис. 2, если ось ЦКР проходит через макушку головы, наибольшего соответствия между кривыми распределения гидростатического давления вдоль тела человека при вращении на ЦКР (синяя линия) и в условиях Земли (красная линия)

удаётся достичь при $n(2) = 26 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$. При этом ε_2 не может быть ниже 11%, так как если оно

становится меньше этого значения, то наблюдается явный «перекос» в распределении гидростатического давления – «недобор» в верхней половине тела и существенный «перебор» в нижней – давление на уровне стоп значительно превышает необходимое значение.

В третьем случае (рис. 1.3) ε_3 не превышает 10% при $n(1) = 21 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ и можно добиться максимального соответствия графиков распределения гидростатического давления в условиях Земли и космоса. Однако радиус ЦКР при этом превышает габариты обитаемых отсеков космической станции ($> 2\text{м}$). В связи с этим ограничением может быть предложен следующий вариант решения – вращение человека в позе «сидя», тогда будет значительно сокращен радиус ЦКР.

Проведем аналогичные расчеты для позы «сидя» в условиях земной гравитации и при вращении.

В условиях земной гравитации в положении человека на рис. 1.4, гидростатическое давление вдоль продольной оси тела человека можно найти по формуле:

$$p_4 = \rho g h_c, \quad (4)$$

где

$$h_c = \begin{cases} h_{\text{если}} \underline{h} \leq h_1; \\ h_{\text{если}} \underline{h}_1 \leq h \leq h_2 \underline{h}_1; \\ h - h_{\text{если}} \underline{h}_2 \leq h_1 \leq 1.75. \end{cases}$$

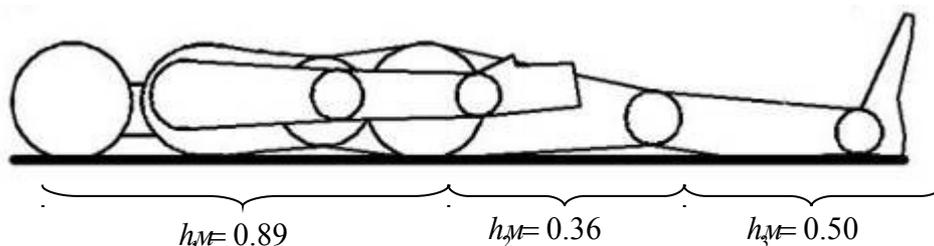


Рис. 3. Основные антропометрические данные, используемые в расчетах.

При вращении на ЦКР в положении сидя:

$$p_5 = \rho a h_c = \rho \omega^2 h_c^2 = \rho \left(\frac{n\pi}{30} \right)^2 h_c^2. \quad (5)$$

Однако гидростатическое давление, создаваемое в такой позе, имеет значительные отличия от земного (рис. 4). Используя уже известные два критерия (ε и близость графиков в конечной точке), максимальное достигнутое соответствие – $\varepsilon_5 = 19\%$ при вращении со скоростью

$n(5) = 29 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$. В связи с этим предложена другая поза человека на ЦКР – шестой вариант (рис.

1.6).

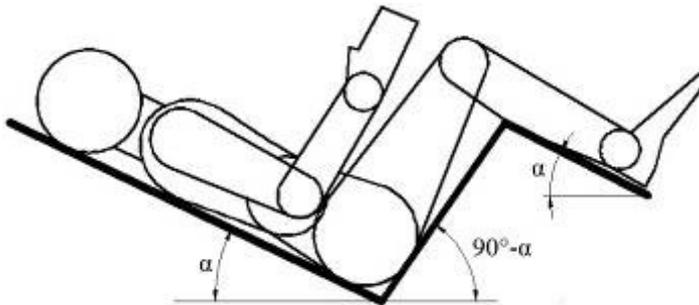
Если человек лежит в таком положении и ось вращения центрифуги проходит через макушку:

$$p_6 = \rho \left(\frac{n\pi}{30} \right)^2 h_{ca}, \quad (6) \quad ()$$

где:

$$h_{ca} = \begin{cases} h \cos \alpha, & h_{-} < h_1; \\ h_1 \cos \alpha + (h - h_1) \cos(90^\circ - \alpha), & h_{-} \leq h_1 < h_1 + h_2; \\ h_1 \cos \alpha + h_2 \cos(90^\circ - \alpha) + (h - h_1 - h_2) \cos \alpha, & h_{-} \geq h_1 + h_2. \end{cases}$$

Угол α :



Тогда $\varepsilon_6 = 13\%$ при $n(5) = 26 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ становится более близким к 0%.

Также как и в предыдущем случае, благодаря увеличению расстояния от макушки человека до оси вращения, можно уменьшить число оборотов и добиться большего соответствия графиков.

$$p_7 = \rho \left(\frac{n\pi}{30} \right)^2 (h_{ca} + L) h_{ca}. \quad (7)$$

- $p_4(h)$ - распределение гидростатического давления крови человека в позе «сидя», на Земле.
- $p_5(h)$ - распределение гидростатического давления крови человека, находящегося в позе «сидя» при вращении на ЦКР.
- $p_6(h)$ - распределение гидростатического давления крови человека при вращении на ЦКР при условии, что он лежит под углом α , и его макушка находится на расстоянии $L(7)$ от оси вращения.

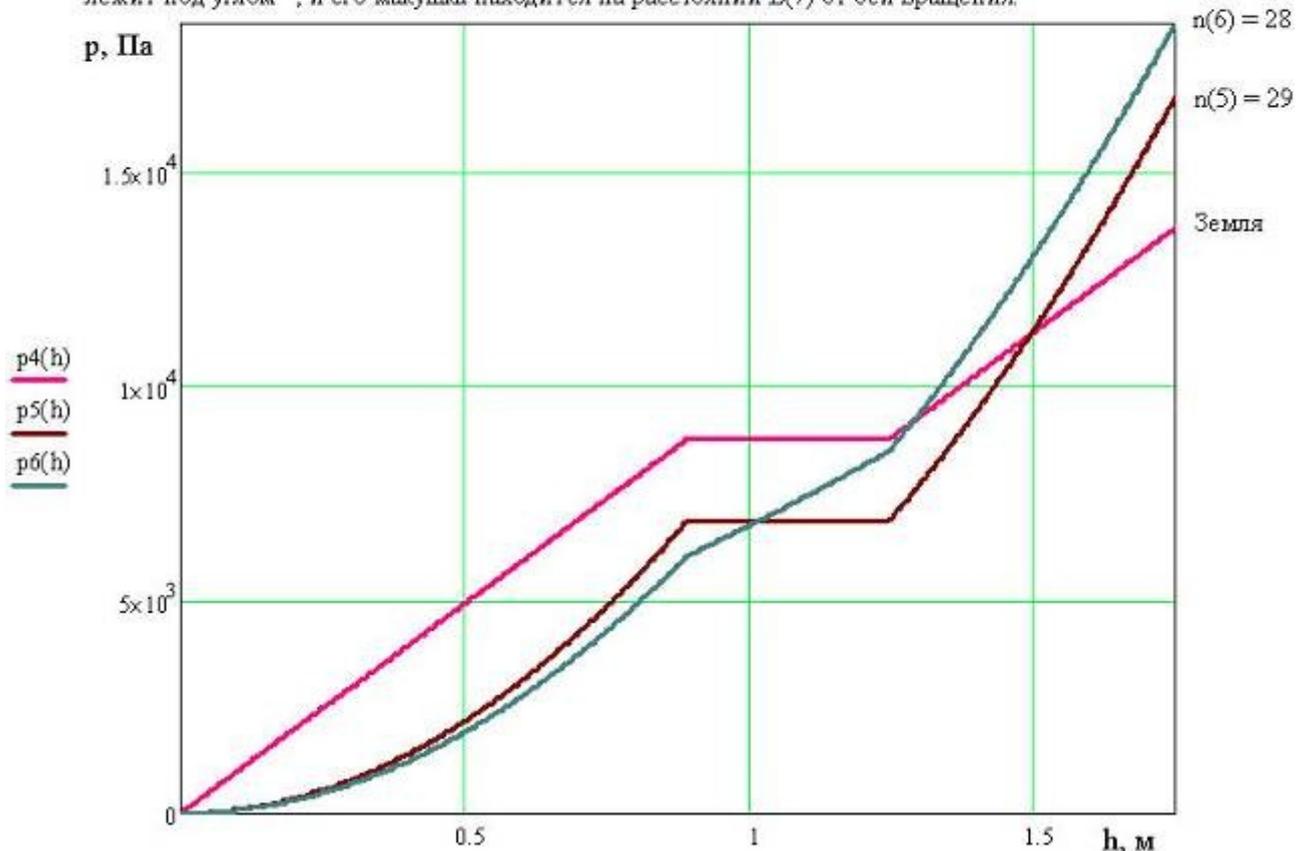


Рис. 4. Распределение гидростатического давления крови человека в условиях земной гравитации и при вращении на ЦКР в положении «сидя».

Заметим, что в позе 1.6 график гидростатического давления более пологий, чем при позе «сидя» в условиях земной гравитации, в связи с этим имеет смысл проводить его анализ по сравнению с позой «стоя» на Земле.

С учетом двух принятых критериев максимальное соответствие, которого можно достичь, –

$\varepsilon_6 = 8\%$ при $n(7) = 25 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ или $\varepsilon_6 = 0\%$ при $n(7) = 28 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ (в последнем случае будет значительный «перебор» в нижней половине тела, как это повлияет на самочувствие человека необходимо проверить практически).

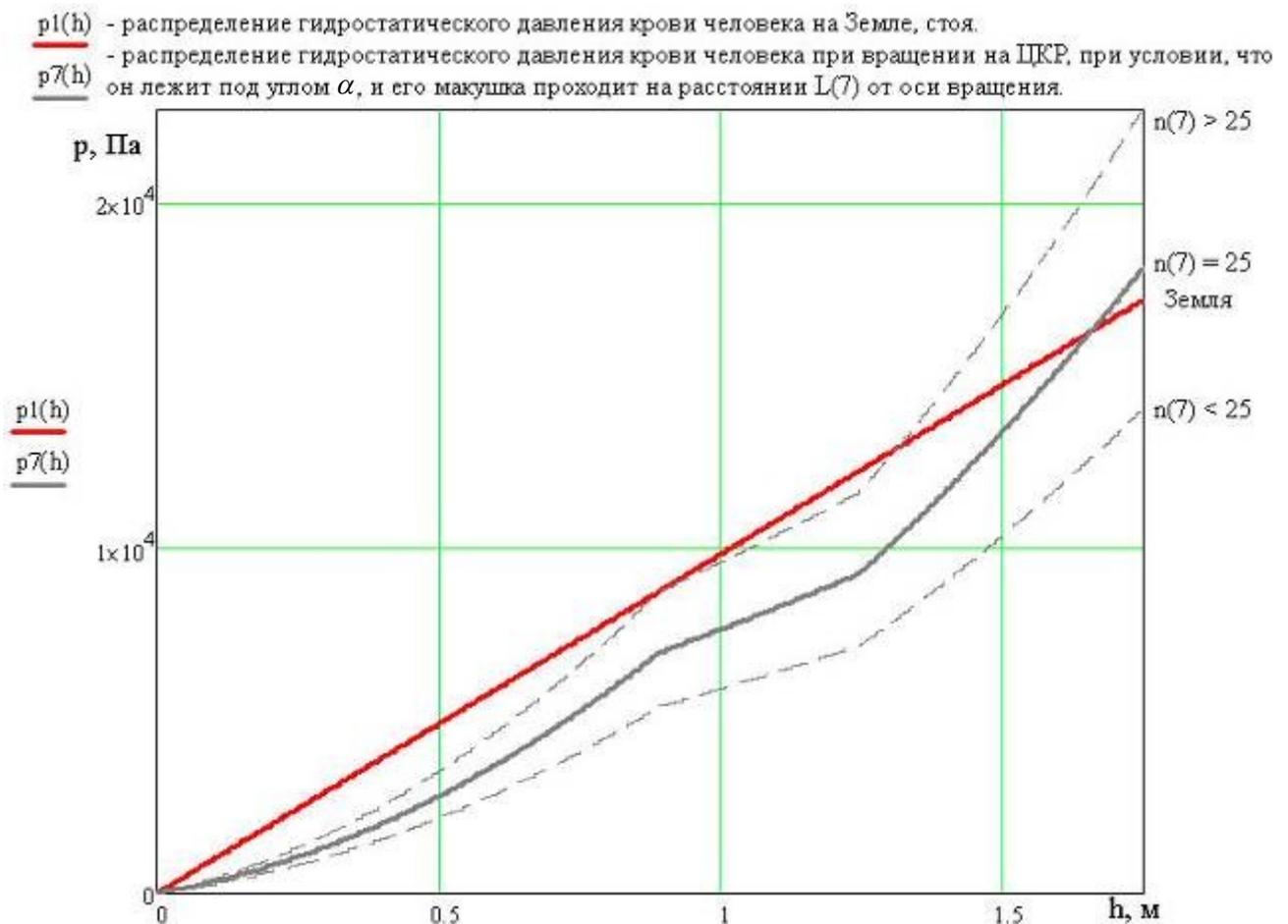


Рис.5. Распределение гидростатического давления крови вдоль тела человека в положении «сидя» по сравнению с положением «стоя» на Земле.

Проведенные расчеты обосновывают выбор позы человека, количества оборотов и расстояния головы человека от оси вращения, которые позволяют создать наиболее близкий к земному гидростатический градиент давления крови вдоль продольной оси тела человека в положениях «лежа» и «сидя».

Однако выбор режимов вращения человека на ЦКР, как нового перспективного средства профилактики неблагоприятного воздействия невесомости при межпланетном перелете, будет базироваться на оценке устойчивости человека и их эффективности.

Список литературы

1. Газенко О.Г. Человек в космосе // Космическая биология, - Москва. 1984. Т.18. ¦1. - с. 3-8.
2. Газенко О.Г. Итоги и перспективы физиологических исследований в космических полетах // Вестник АМН СССР, - Москва. 1984. ¦4. - с. 7-12.
3. Газенко О.Г., Григорьев А.И., Наточин Ю.В. Водно-солевой гомеостаз и космический полет // Проблемы космической биологии. - Москва. - 1986, ¦54, - с. 240.
4. Козловская И.Б., Степанцов В.И., Егоров А.Д. Физические тренировки в длительных полетах// «Космическая биология и медицина», в 2-х томах. Том 1. Медицинское обеспечение длительных полетов. Орбитальная станция «Мир», - Москва. - 2001. - с. 391-412.
5. Котовская А.Р., Шипов А.А., Виль-Вильямс И.Ф. Медико-биологические аспекты проблемы создания искусственной силы тяжести. – М.: Слово. - 1996г. - 203 с.
6. Виль-Вильямс И.Ф. Основные подходы к выбору режимов применения центрифуги короткого радиуса в длительных космических полетах // Авиакосмическая и экологическая медицина, - 1993. ¦5-6, - с. 46-51.
7. Оганов В.С. Состояние костной ткани// Космическая биология и медицина, в 2-х томах. Том 1. Медицинское обеспечение длительных полетов. Орбитальная станция «Мир», Москва. - 2001г. - с. 391-412.
8. White W.J. Space-Based Centrifuge. // In. 1-st symposium on the role of the vestibular organs in the exploration of space. Washington. - 1965 , - p.p. 209-213.
9. Виль-Вильямс И.Ф. Влияние периодических воздействий перегрузок "голова-таз" на центрифуге короткого радиуса на ответные реакции сердечно-сосудистой системы человека. // Космическая биол., - 1980, т. 14, ¦4, с. 48-51.
10. Iwasaki K., Hirayanagi K., Sasaki T. et al. Effects of repeated long duration +2Gz load on man's cardiovascular function // Acta Astronautica, - 1998, V. 42, ¦1 -8, - p. 175-183.
11. Акулов В.А. Нелинейная модель гемодинамики нижних конечностей с учетом искусственной гравитации// Обзорение прикладной и промышленной математики. – 2001, ¦8. – с.1
12. Осадчий Л.И. Положение тела и регуляция кровообращения. – Ленинград: Наука. 1982г. – 215 с.

Сведения об авторах

Пичулин Владимир Сергеевич – доцент кафедры жизнеобеспечения пилотируемых аппаратов Московского Авиационного Института (Государственного Технического Университета), к.т.н.

Лукьянюк Василий Юрьевич – ведущий научный сотрудник лаборатории физиологии ускорений и искусственной силы тяжести Государственного научного центра Российской Федерации – Института медико-биологических проблем Российской Академии наук (ГНЦ РФ – ИМБП РАН), к.м.н.

Соболева Анастасия Юрьевна – студентка 5 курса кафедры жизнеобеспечения пилотируемых аппаратов Московского Авиационного Института (Государственного Технического Университета), старший лаборант-исследователь лаборатории физиологии ускорений и искусственной силы тяжести Государственного научного центра Российской Федерации – Института медико-биологических проблем Российской Академии наук (ГНЦ РФ – ИМБП РАН).