

УДК 681.51.012 : 531.5

**МЕТОДОЛОГИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СИСТЕМЫ  
«ЧЕЛОВЕК - КОРОТКОРАДИУСНАЯ ЦЕНТРИФУГА» С ИМИТАЦИЕЙ  
ФАКТОРОВ ГИПОГРАВИТАЦИИ ЛУНЫ И МАРСА**

© 2018 В. А. Акулов

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 10.12.2018

Излагается методология исследований систем «человек – короткорядиусная центрифуга», предназначенных для имитации факторов гипогравитации Луны и Марса в наземных условиях и выявления скрытых закономерностей состояний человека. Специфику и новизну методологии составляют: двунаправленность исследований - пилотируемая космонавтика и гравитационная терапия; авторская информационно-аналитическая система, обеспечивающая вычисление индивидуальных режимов вращения в зависимости от целенаправленности эксперимента; сочетание экспериментальных и теоретических методов исследований с построением упрощённых математических моделей, доступных широкому кругу пользователей; двухточечный доступ для количественной оценки гемодинамики по схеме «рука – лодыжка».

*Ключевые слова:* гипогравитация Луны и Марса, система «человек – короткорядиусная центрифуга», управление, математическое и компьютерное моделирование, периферическая гемодинамика.

*Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ №17-48-63083А\18*

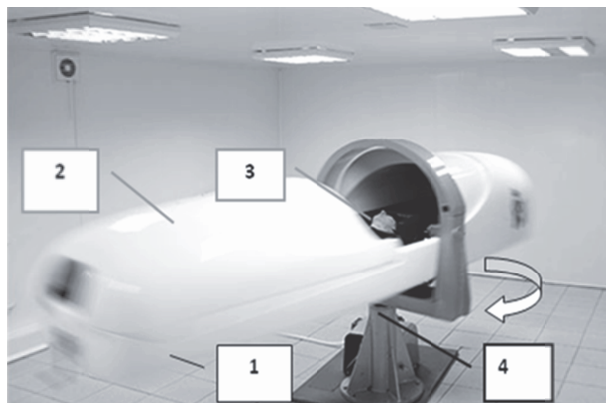
**ВВЕДЕНИЕ**

«Федеральная космическая программа на 2016 – 2025 годы» предусматривает переход от орбитальных полётов человека на Международной космической станции (МКС) к освоению «Дальнего Космоса». Под этим понимаются длительные, продолжительностью до 20 – 30 суток, пребывания экипажей на поверхности Луны и Марса с выполнением значительного объёма научных и прикладных исследований. Аналогичные программы приняты в США, Китае и других странах. Необходимо отметить, что освоение Дальнего Космоса является качественно новой проблемой. Прежде всего, существенно усложняется профиль полёта, под которым понимается возникновение новых внешних факторов, отсутствующих при подготовке и выполнении полётов на МКС. К их числу относятся гипогравитация Луны и Марса.

Как показывает многолетний опыт, успехи в Космосе в значительной степени определяются эффективностью наземной подготовки экипажей, составной частью которой являются тренировки в условиях, максимально приближенных к натурным. Следовательно, существенные изменения внешних условий, связанных с освоением дальнего Космоса, потребуют мо-

*Акулов Владислав Алексеевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационных технологий. E-mail: vladislav.a.akulov@gmail.com*

дернизации процесса подготовки и тренировки экипажей с применением новых тренажёров, имитирующих гипогравитацию [1] – [4]. Таки ми устройствами являются короткорядиусные центрифуги (ЦКР), которые благодаря компактности могут быть установлены непосредственно на борту перспективных космических аппаратов, что немаловажно [1] - [5]. В результате формируется сложная система класса «человек – ЦКР» (рис. 1).



**Рис. 1.** Общий вид типовой системы «человек – ЦКР»  
Обозначения: 1. Ротор – горизонтальный стол.  
2. Кабина пациента. 3. Пациент в позе «лёжа», ногами к периферии. 4. Ось вращения.

С научно-технической точки зрения проблема моделирования гравитации планет на ЦКР заключается в создании управляемой искус-

ственной силы тяжести (ИСТ), эквивалентной естественной силе тяжести (ЕСТ, Земля, Луна, Марс) по воздействию на человека. К настоящему времени эта проблема решена лишь частично [1], [2]. Согласно существующему подходу в качестве метрики принимается максимальное значение перегрузки на периферийном радиусе ( $+G_z^{\max}$ ). Достоинствами такого подхода являются простота и наглядность, но он недостаточен для определения режимов вращения, имитирующих факторы гипогравитации. Основные затруднения обусловлены структурными различиями напряжённости полей ЕСТ (однородность) и неоднородность ИСТ по радиусу и частоте вращения, которая следует из известной формулы

$$G_{цб} = \omega^2 r / g, \quad (1)$$

где  $G_{цб}$  – перегрузка в радиальном направлении, обусловленная действием центробежного ускорения (индекс «цб»);  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора ЦКР;  $r$  – текущий радиус;  $0 < r \leq h$ ,  $h$  – рост испытуемого;  $g$  – ускорение свободного падения.

Таким образом, чтобы сгенерировать на ЦКР модельную гипогравитацию необходимо разрешить комплекс задач, связанных с преодолением неоднородности ИСТ, причём с учётом значительного числа факторов. Основные из них – напряжённость поля моделируемых планет, рост испытуемых, их расположение (смещение) относительно оси вращения. Специфику данных исследований составляет двунаправленность, под которой понимается решение задач, актуальных как для пилотируемой космонавтики, так и для гравитационной терапии (ГТ). ГТ представляет собой разновидность восстановительной медицины, основу которой составляет применение управляемой искусственной силы тяжести (ИСТ) для лечения тяжёлых патологий нижних конечностей, обусловленных облитерацией сосудов, травмами и переломами [6]. Отметим, что задачи отбора, подготовки космонавтов и ГТ, в значительной степени идентичны. В их числе, разработка циклограмм вращения, поиск наиболее эффективных режимов вращения, параметрическая безопасность, исследование реакции жизненно важных органов на вариацию гравитационной нагрузки, кранио-каудальная направленность воздействия (общность позы испытуемых), и т. д. Учитывая изложенное постановка задачи принимает следующий вид.

**Объект исследований:** сложная управляемая система «человек – ЦКР».

**Предмет исследований:** имитация факторов гипогравитации на ЦКР для выполнения научных исследований, связанных с подготовкой космонавтов к освоению дальнего Космоса.

**Цель исследований.** Разработка и апроба-

ция методологии, предназначенной для имитации факторов гипогравитации Луны и Марса в наземных условиях и обеспечивающей исследований реакции организма человека на вариации гравитационной нагрузки

#### **Задачи исследований**

1. Разработка технологической схемы экспериментов с имитацией факторов гравитации Земли, Луны, Марса.

2. Разработка и реализация алгоритмов управления, обеспечивающих индивидуальную настройку ЦКР для достижения поставленных целей.

3. Выполнение исследований системы «человек – ЦКР».

4. Построение эмпирических и теоретических моделей состояния человека в условиях искусственной гипогравитации Луны и Марса.

5. Формулировка направлений дальнейших исследований

**Методы исследований.** Натурные эксперименты систем «человек – ЦКР», компьютерное моделирование.

## **1. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **1.1. Разработка технологической схемы экспериментов**

Под технологической схемой, разработка которой предусмотрена задачей № 1, понимается перечень процедур, обеспечивающих получение эмпирических и теоретических моделей состояний человека в широком диапазоне вариаций значений и направлении внешнего воздействия, включая гипогравитацию Луны и Марса (таблица 1).

Состояние человека определялось при шести режимах воздействия. Режимы 1, 2, 6 являются базовыми и служат для получения исходных значений, относительно которых определяется изменение состояний человека. Так как гипогравитация по интенсивности воздействия занимает промежуточное положение между невесомостью и нормой (ортостаз на поверхности Земли), то предусмотрена оценка её «местоположения» относительно указанных крайних состояний. Очевидно, что от результатов такой оценки зависит решение целого ряда задач, в числе которых разработка и модернизация тренажёров, методики предполётной подготовки и медицинского обеспечения экипажей межпланетных миссий.

Учитывая сложный профиль полёта, при выполнении которого будет происходить многократное изменение интенсивности гравитационного поля, предусмотрено исследование гистерезиса отклика организма с чередованием режимов возрастания и убывания нагрузки. По-

Таблица 1. Технологическая схема экспериментов

№	Наименование режима воздействия	Примечание
1	Ортостаз	Определяются базовые показатели состояний для каждого из испытуемых (норма). Исходная информация для оценки адекватности модели управления системой «человек – ЦКР».
2	Клиностастика	Оценка состояния пациентов по существующим стандартам. Исключение испытателей с патологией системы кровообращения. Влияние смены позы относительно нормы (позиция 1)
3	Вращение на ЦКР с имитацией гипогравитации Луны	Оценка состояния пациентов с имитацией факторов гипогравитации Луны
4	Вращение на ЦКР с имитацией гипогравитации Марса	Оценка состояния пациентов с имитацией факторов гипогравитации Марса
5	Вращение на ЦКР с имитацией гравитации Земли (ортостаз)	Информация, необходимая для оценки адекватности авторской модели управления системой «человек – ЦКР» и её достоверности при определении индивидуальных режимов вращения (рост, смещение относительно оси вращения, моделируемая планета)
6	Клиностастика (повторно)	Оценка состояния пациентов после сеансов вращения. Сравнение с исходным состоянием (режим № 2)
7	Обработка данных	Построение эмпирических моделей гемодинамики. Выявление скрытых закономерностей.
8	Обобщение эмпирических моделей	Регрессионный анализ

добные исследования необходимы для разработки методологии подготовки космонавтов. Если гистерезис явно выражен, то его необходимо учитывать и осуществлять соответствующие тренировки, что усложняет технологию подготовки. Для оценки гистерезиса были применены две схемы воздействия. По первой схеме интенсивность нагрузки возрастала. Для этого технологические переходы выполнялись в последовательности: 2 - 3 - 4 - 5 (см. таблицу 1). По второй схеме осуществлялось снижение интенсивности, и переходы выполнялись в обратной последовательности.

### 1.2. Разработка и реализация алгоритмов управления

Проблема моделирования факторов гипогравитации заключается в построении системы класса «человек – ЦКР», эквивалентной по своему воздействию системам «человек – поверхности планет», что является, прежде всего,

проблемой управления. Её основу составляет разработка и применение алгоритмов, обеспечивающих вычисление частоты вращения ротора ЦКР с учётом значительного числа исходных данных, т. е. индивидуальную настройку ЦКР (см. таблицу 1). Как указывалось, традиционный подход к управлению ЦКР, основанный на применении параметра  $+G_z^{\max}$ , недостаточен для определения режимов моделирования гипогравитации. Задача состоит в управлении системой «человек – ЦКР», в то время как  $+G_z^{\max}$  представляет собой один из параметров, характеризующих разомкнутую систему, т. е. ЦКР без объекта воздействия. Выход из создавшегося затруднения был найден в системном подходе и расширении числа учитываемых факторов, которые послужили основой для разработки алгоритмов управления

Как свидетельствует более чем полувековой опыт пилотируемой космонавтики, человек является гравитационно зависимым субъектом. Под этим понимается зависимость его состо-

яния от напряжённости гравитационного поля. Примером служит состояние людей после много-суточного пребывания в невесомости, требующее реабилитации, длительность которой соизмерима с продолжительностью пребывания в Космосе. Следует отметить, что периферическая система кровообращения наиболее подвержена вариациям гравитационной нагрузки. В связи с этим проанализируем её с позиций гидромеханики.

Как известно, гравитация создаёт гидростатическое давление (ГД) столба жидкости, которое вычисляется по формуле

$$\Delta p_{ГД} = \rho g \beta \Delta h, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости (крови),  $\beta$  – поправочный коэффициент на величину ускорения свободного падения (для Земли  $\beta_z = 1$ ; для Марса  $\beta_m = 0,4$ ; для Луны  $\beta_l = 0,17$ ),  $\Delta h$  – пьезометрическая высота столба жидкости.

Применив формулу (2) к периферической гемодинамике получим, что  $\Delta p_{ГД}$  на уровне лодыжки человека среднего роста достигает 100 мм. рт. ст. (высота столба «сердце – стопа»  $\Delta h \sim 1,5$  м,  $\beta_z = 1$ ). Соизмеримость  $\Delta p_{ГД}$  с системным артериальным давлением означает, что земная гравитация выполняет функцию бустерного насоса, что придаёт ей особую значимость. На поверхности Марса ( $\beta_m = 0,4$ ) и Луны ( $\beta_l = 0,17$ )  $\Delta p_{ГД}$  существенно ниже и составляет около 40 мм. рт. ст. и 17 мм. рт. ст., соответственно. В невесомости ( $\beta_n = 0$ ) оно обращается в нуль. Совершенно очевидно, что указанные закономерности, характеризующие реакцию человека на вариацию нагрузки (ослабление эффективности бустерного насоса), необходимо воспроизвести на ЦКР.

В связи с этим проанализируем инерционное давление (ИД), обусловленное вращением ротора ЦКР  $\Delta p_{ИД}$  и которое призвано заменить  $\Delta p_{ГД}$ . Для этого воспользуемся формулой, известной из гидромеханики

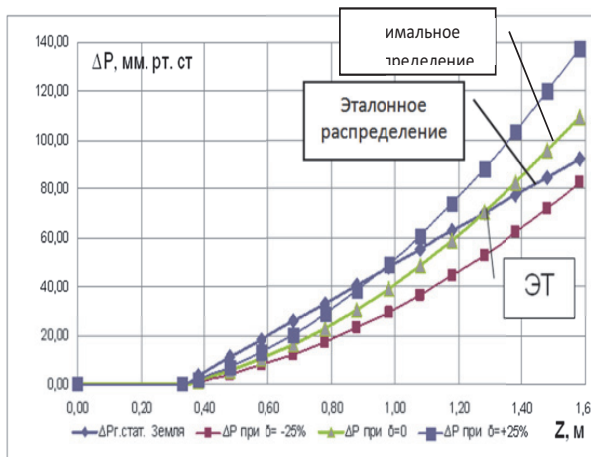
$$\Delta p_{ИД} = \rho \omega^2 (z^2 - r_1^2) / 2. \quad (3)$$

Здесь  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора,  $z$  – текущая координата, отсчитываемая от оси вращения,  $r_1$  – координата начального сечения сосуда (расстояние от оси вращения до сердца),  $r_1 \leq z \leq h$ .

На рисунке 2 приведён совмещённый график распределений  $\Delta p_{ГД}$  и  $\Delta p_{ИД}$  вдоль продольной оси человека среднего роста. Эталонным обозначено распределение  $\Delta p_{ГД}$  у Земли (норма, ортостаз). Для удобства сравнения его график условно повернут на 90 град против часовой стрелки. В отличие от линейной зависимости  $\Delta p_{ГД}$  от продольной координаты (2), распределения (3) нелинейны. Кроме того, они представляют собой некоторое подмножество, что обусловлено зависимостью от  $\omega$ , которая также нелинейна. В целях определённости и наглядно-

сти на рис. 2 представлены только три распределения из числа возможных.

Как следует из рисунка 2, отличия в распределениях (2) и (3), а, вместе с ними, отличия модельных и натуральных условий неизбежны. В то же время, существует некоторое, причём особо значимое распределение, принадлежащее семейству (3), которое обладает минимальными отличиями от эталона. Будем именовать его «оптимальным».



**Рис. 2.** Типовой пример распределений гидростатического и инерционного давления жидкости по координате  $z$   $\Delta p_{ИД} = \Delta p_{ГД}$  (кранио-каудальное направление)

Отметим, что оптимальное распределение в силу нелинейности состоит из двух интервалов. Левее точки ЭТ (эквивалентная точка, в которой  $\Delta p_{ИД} = \Delta p_{ГД}$ ) инерционное давление ниже гидростатического, а правее – выше. Указанное свойство характеризует отличие ИСТ и ЕСТ, но его величина не превышает 10% в наиболее удалённой от оси вращения точки.

Таким образом, формируются две задачи. Первая из них состоит в поиске оптимального распределения с разработкой критерия адекватности ИСТ и ЕСТ, а вторая – в выработке индивидуализированной управляющей информации ( $\omega$ ), обеспечивающей его реализацию на ЦКР (индивидуальную настройку). Что касается решения первой задачи, то в результате применения критерия Хи-квадрат и энергетической трактовки формул (2) и (3) получено следующее выражение, предназначенное для критериальной оценки адекватности [8]

$$\delta = \left( \frac{\omega^2}{3\beta g} \frac{h^3 - r_1^2 (3h - 2r_1)}{(h - r_1)^2} - 1 \right) \cdot 100 \%. \quad (4)$$

Отметим ряд важных моментов, следующих из критерия (4).

- Критерий является алгоритмической основой для построения системы управления ЦКР различного назначения, в числе которых тренажёры космонавтов и пилотов скоростных самолётов.



- Критерий построен с учётом значительного числа параметров, относящихся к системе «человек – ЦКР». В их числе, рост человека ( $h$ ), его расположение (смещение относительно оси вращения) на ЦКР ( $h - r_1$ ), интенсивность гравитационного поля планет ( $\beta g$ ), угловая скорость вращения ротора ЦКР ( $\omega$ ).

- Простота адаптации к специфике решаемых задач, представляющих интерес для космонавтики и ГТ (таблица 2).

В общей сложности получено около десяти разновидностей формулы (4), обеспечивающих достижение разнообразие целей, в том числе, режимов 3 – 5 таблицы 1. Учитывая многообразие задач, связанных с имитацией гравитационной нагрузки, и необходимости индивидуальной настройки ЦКР, зависящей от многих факторов, разработан интерфейс пользователей в виде информационно-аналитической системы, названной программой - навигатором. Её основные задачи: планирование экспериментов, обеспечение параметрической безопасности и выработка управляющей информации ( $\omega$ ) на основе расчётов, выполненных по формуле (4) и её модификациям [6] - [8].

### 1.3. Оценка адекватности модели «человек – ЦКР» системам «человек – поверхность планет»

Учитывая, что ЦКР является моделью ЕСТ, а режимы вращения, имитирующие действие гипогравитации, определяются расчётным путём, возникла задача по оценке адекватности авторской математической модели системы «человек – ЦКР» натурным условиям. Основное затруднение состояло в невозможности применения прямых методов оценки, т. к. для них необходимы эксперименты на соответствующей планете с участием человека [8] – [10]. В связи с этим были разработаны косвенные методы оценки адекватности. Их основу составляет сравнение эмпирических данных (сходства, различия), полученных при ортостазе (таблица 1, режим 1) и его имитации на ЦКР (режим 5) с последующим распространением выявленных зависимостей на режимы гипогравитации. Обоснованием такого подхода служит тот факт, что все режимы вращения (3 – 5) рассчитывались на единой модели системы «человек – ЦКР».

Как указывалось (рисунок 2), инерционное давление в концевом сечении в силу нелинейности несколько превышает эталонное значение. Однако при имитации гипогравитации, которая осуществляется при пониженных значениях  $\omega$ , расхождение между  $\Delta p_{ид}$  и  $\Delta p_{гд}$  уменьшится за счёт менее выраженной нелинейности (3), что важно с точки зрения полноты имитации.

Что касается системы регистрации состояния испытуемого, учитывая закономерности (2) и (3), была разработана и применена двухточечная неинвазивная схема доступа к артериальному руслу вида «рука – нога (лодыжка)». Измерения давления осуществлялись автоматическими тонометрами типа ОМРОН, оснащёнными внутренней памятью большого объёма и встроенными часами. Часы использовались для синхронизации показаний. Управление тонометрами осуществлялось по радиоканалу, для чего была разработана портативная система управления [7].

В качестве основных показателей периферической гемодинамики были выбраны лодыжечно-плечевой индекс (ЛПИ) и среднее артериальное давление (АД<sub>ср</sub>). Значимость ЛПИ состоит в том, что он учитывает динамический перепад давления в артериальном русле. Вычисления выполнялись по формуле

$$ЛПИ = АД_{s\_нога} / АД_{s\_рука}, \quad (5)$$

где  $АД_{s\_нога}$ ,  $АД_{s\_рука}$  – систолическое давление, зарегистрированное на лодыжке (нога) и руке, соответственно.

Что касается среднего артериального давления, то оно является простым и наглядным показателем, учитывающим как статическую составляющую пульсирующего потока (диастолическое давление  $АД_d$ ), так и динамическую составляющую (различие  $АД_s$  и  $АД_d$ ). Оно вычисляется по формуле

$$АД_{ср} = АД_d + (АД_s - АД_d) / 3. \quad (6)$$

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1. Эмпирические модели состояний человека в среде искусственной силы тяжести

На рис. 3 приведены типовые зависимости параметра ЛПИ от интенсивности гравитационной нагрузки, которая управлялась частотой вращения ротора ЦКР. В целях обобщения полученных данных по горизонтали отложена относительная частота вращения ( $Notn$ ). За единицу принята частота, соответствующая режиму моделирования гравитации Земли. Тогда гипогравитация Луны и Марса моделируется при значениях  $Notn$ , равных 0,4 и 0,6, соответственно. По вертикали отложены средние значения ЛПИ (сплошная линия), и значения с учётом среднего квадратического отклонения (пунктирные линии).

Из рисунка 3 следует ряд важных утверждений относительно основных тенденций и закономерностей отклика ЛПИ на вариацию гравитационной нагрузки. В целях наглядности далее сопоставляются только средние значения параметра.

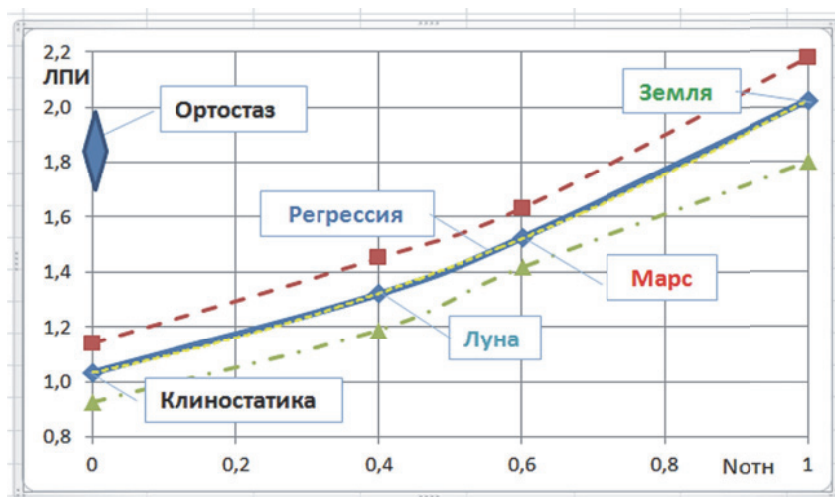


Рис. 3. Зависимость величины ЛПИ от интенсивности модельной гравитации  
Уравнение регрессии  $y = 0,4438 x^2 + 0,5493 x + 1,032$

1. Получено очередное, причём количественное подтверждение того, что человек является гравитационно зависимым субъектом. Перепад давления в периферической системе кровообращения существенно зависит от гравитационной нагрузки.

2. Переход от режима «Земля» (имитация позы «ортостаз» (норма)) к позе «клиностатика», которое является приближением к состоянию невесомости, сопровождается двукратным снижением ЛПИ от значений, равных 2,0 до 1,0, т. е. существенно.

3. При моделировании факторов гипогравитации Луны и Марса абсолютные значения ЛПИ составили 1,3 и 1,5, соответственно, т. е. 65% и 75% по отношению к норме.

4. Получено экспериментальное подтверждение адекватности авторской модели системы «человек – ЦКР» методом сравнения данных, полученных при ортостазе и его модели на ЦКР (Нотн = 1).

5. Подтверждено, что отличия в распределениях давления, обусловленные неоднородностью ИСТ (ЦКР), установленные теоретически в разделе 1.2, не превышают 10% (см. позиции «Земля» и «Ортостаз» на рис. 3).

С целью установления причин существенного отклика периферической гемодинамики на вариации гравитационной нагрузки проанализировано среднее артериальное давление, зарегистрированное на руке (АДср\_руки) и ноге (АДср\_ноги, формула 6, рис. 4). Как следует из представленного графика, АДср\_руки при изменении гравитационной нагрузки в широком диапазоне значений остаётся практически постоянным. Отличия не превышают 6 мм. рт. столба. Это означает, что в условиях гипогравитации система регуляции АД справляется со своими функциями. Иная закономерность установлена для параметра АДср\_ноги, который из-

меняется в диапазоне 193 – 85 мм. рт. т. е. в два раза. Именно отклик АДср\_ноги на вариации интенсивности внешнего воздействия и определяет закономерности изменения параметра ЛПИ, представленных на рисунке 3. Значимость полученных результатов состоит в том, что выявлены закономерности изменения состояния человека в условиях модельной гипогравитации (статика и динамика периферической системы кровообращения).

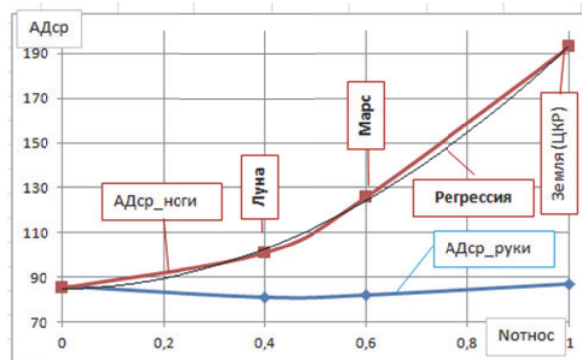
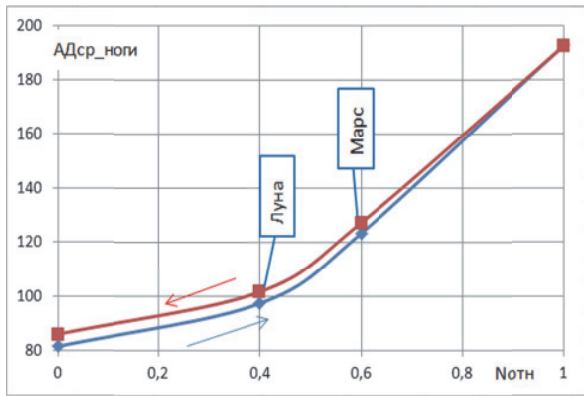


Рис. 4. Влияние гравитационной нагрузки на АДср\_руки и АДср\_ноги.  
Уравнение регрессии  $y = 106,25 x^2 + 2,403 x + 84,673$

Одной из новых и важных задач, которая решалась при имитационных экспериментах, является оценка гистерезиса состояний человека на чередование процессов возрастание и убывание интенсивности внешнего воздействия, которое, как указывалось, характерно для межпланетных миссий. Поскольку АДср\_руки не зависит от нагрузки, то исследовались закономерности отклика параметра АДср\_ноги (рис.5). В целях наглядности рассеяние параметра не показано.

Как следует из рисунка 5, в широком диапазоне изменения интенсивности внешнего



**Рис. 5.** Оценка гистерезиса отклика состояния человека на изменения направления нагружения. Стрелками обозначены направления изменения частоты вращения

воздействия, включая гипогравитацию Луны и Марса, гистерезис практически отсутствует. В то же время, траектория изменения АД при снижении нагрузки располагается несколько выше, чем при увеличении, но разность значений не превышает 6 мм. рт. ст. В конечном итоге отсутствие гистерезиса является важным результатом. В противном случае потребовалось бы усложнение процессов подготовки и тренировки экипажей для освоения дальнего Космоса.

## 2.2. Теоретические модели состояний человека в среде искусственной силы тяжести

Теоретическое обобщение эмпирических данных (задача №4) выполнено методами регрессионного анализа. В качестве уравнений регрессии выбраны параболы вида  $\bar{y}_i = ax_i^2 + bx_i + c$ , где  $\bar{y}_i$  – теоретические значения параметра;  $x_i$  – относительная частота вращения;  $a, b, c$  – неизвестные коэффициенты. Основанием для выбора парабол послужил известный закон гидромеханики (3), согласно которому  $\Delta p_{гд}$  пропорционально  $\omega^2$ , а, следовательно,  $N^2$ .

В качестве примеров на рисунках 3, 4 показаны уравнения и линии регрессий (ЛПИ и АДср\_ноги), которые практически совпадают с эмпирическими зависимостями. Отметим значимость полученных результатов. Во-первых, сложные процессы, происходящие в периферической системе кровообращения при вариации напряжённости гравитационного поля в широких пределах, следуют законам гидромеханики. Во-вторых, относительная простота уравнений регрессий обеспечивает их доступность широкому кругу пользователей, не имеющих подготовки в области информационных технологий.

## НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Система «человек - центрифуга» является моделью, т. е. одним из возможных, причём упрощённых представлений систем «человек – поверхность планет». Так как речь идёт об эффективности перспективной космонавтики и здоровье экипажей, находящихся от Земли на расстоянии в сотни тысяч километров, целесообразно расширение номенклатуры устройств, создающих управляемую гипогравитацию. В связи с этим выполнена проработка вариантов применения центрифуги большого радиуса ЦФ-18 Центра подготовки космонавтов имени Ю. А. Гагарина (рис. 6).

Как показали расчёты и анализ конструкции центрифуги, после некоторой её модернизации существенно расширяются масштабы исследований и перечень решаемых задач, что очень важно для реализации элементов Федеральной космической программы. Во-первых, обеспечиваются режимы имитации гипогравитации с менее выраженной неоднородностью поля ИСТ, обусловленной большим радиусом (18 м против 2 м ЦКР). Во-вторых, обеспечивается имитация газового состава российского и зарубежного космического скафандров. В-третьих, ЦФ-18 выполнена по двухместной схеме, позволяющей разместить не только испытуемого (космонавта), но и специалиста по УЗДГ (рис. 7).

По сравнению с ЦКР создаются условия для более детального изучения состояния человека в условиях гипогравитации. Кроме того, в такой компоновке ЦФ-18 превращается в прототип тренажёра экипажей для выполнения межпланетных миссий.

Таким образом, в перспективе предлагается расширение объёма исследований и перечня решаемых задач с применением двух разновидностей центрифуг (ЦКР, ЦФ-18), а также наклонных стендов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана и апробирована методология исследований систем «человек – короткорadiusная центрифуга», предназначенных для имитации факторов гипогравитации Луны и Марса в наземных условиях и выявления скрытых закономерностей состояний человека. Основу методологии составляет системный подход к объектам класса «человек – ЦКР», «человек – поверхность планет», полноразмерные эксперименты и применение компьютерных моделей. Адекватность объектов оценивается по балансу энергии, сообщаемой системе кровообращения со стороны гравитации планет и центростремительного ускорения.





**Рис. 6.** Общий вид центрифуги ЦФ-18.  
На переднем плане участники XII  
Международной конференции  
«Пилотируемые полёты в Космос»



**Рис. 7.** Общий вид двухместной кабины  
со стороны входа. Люки открыты.  
В левом отсеке предполагается размещение  
испытателя (космонавта), в правом - врача УЗДГ

2. Разработаны и реализованы в виде информационно-аналитической системы алгоритмы управления, обеспечивающие индивидуальную настройку ЦКР в соответствии с данными испытуемых и задачами исследований, актуальными для пилотируемой космонавтики и восстановительной медицины.

3. Выполнены комплексные исследования состояний человека, находящегося в условиях модельной гипогравитации Луны и Марса. В качестве основных показателей выбраны лодыжечно-плечевой индекс (сегментарный перепад давления) и среднее артериальное давление, учитывающие как статическую, так и динамическую составляющую пульсирующего потока крови.

4. Получены новые знания о состояниях человека в условиях искусственной гипогравитации. Установлено, что значение лодыжечно-плечевого индекса в условиях моделирования Луны составляет ~ 0,75 от нормы, а Марса ~ 0,8. Столь значительные отличия перепада давления от нормы требуют продолжения исследований, а полученные данные следует учитывать при подготовке и реализации перспективных программ пилотируемой космонавтики.

5. Установлено, что при вариации гравитационной нагрузки в широких пределах, включая гипогравитацию Луны и Марса, среднее значение артериального давления на уровне руки остаётся практически постоянным. Это свидетельствует об эффективности системы регуляции человека. В то же время, давление на лодыжке существенно зависит от интенсивности гравитационного поля. Именно оно вызывает существенные вариации сегментарного перепада давления.

6. Установлено, что гистерезис состояний человека при чередовании возрастания и убывания гравитационной нагрузки, включая гипо-

гравитацию, отсутствует. Это означает, что не требуется корректировки подготовки космонавтов по этому параметру.

7. Выполнено теоретическое обобщение эмпирических зависимостей методами регрессионного анализа. Показано, что простая и наглядная параболическая регрессия применима к решению рассматриваемого класса задач. Согласованность эмпирических и теоретических моделей с моделями гидромеханики свидетельствует также о корректности предлагаемой методологии исследований.

8. В качестве нового направления исследований предлагается применение центрифуги большого радиуса ЦФ-18, установленной в ФГБУ НИИЦПК имени Ю. А. Гагарина. Её конструктивные и эксплуатационные особенности позволяют существенно расширить перечень решаемых задач с более полным воспроизведением факторов гипогравитации. А) Благодаря большому радиусу (18 м вместо 2 м на ЦКР) неоднородность силового поля менее выражена, а, следовательно, достигается более точное моделирование гипогравитации. Б) Кабина ЦФ-18 является двухместной. Впервые предлагается размещение в одном из отсеков врача УЗДГ, который обеспечит более детальное исследование состояния испытуемого (космонавта). На ЦКР вследствие габаритов и высокой скорости вращения выполнение УЗДГ-обследований, а они весьма информативны, крайне затруднено. В) На ЦФ-18 возможно воспроизведение газового состава как российского, так и зарубежных скафандров, предназначенных для внекорабельной деятельности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Газенко О. Г., Григорьев А. И., Егоров А. Д. От 108 минут до 438 суток и далее... (к 40-летию полета Ю. А. Гагарина) // Авиакосмическая и экологическая



- медицина. М: 2001. Т. 35. № 2. С. 10-11.
2. Котовская А.Р., Вильямс Виль - И. Ф., Лукьянюк В.Ю. Проблема создания искусственной силы тяжести с помощью центрифуги короткого радиуса для медицинского обеспечения межпланетных пилотируемых полетов // Авиакосмическая и экологическая медицина. М: 2003. Т. 37, №5. С. 36-39.
  3. Падалка Г.И., Долгов П.П., Киришинов В.Н. Задачи подготовки космонавтов на центрифугах по перспективным космическим программам // Материалы «Космического форума 2011, посвященного 50-летию полета в космос Ю.А. Гагарина». – ФГБУ НИИЦПК, 18–19 октября 2011.
  4. Долгов П.П., Киришинов В.Н., Чудинов А.П. Основные направления работ на центрифугах и их целевого применения // Материалы XI Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полёты в космос», посвященной 55- летию ФГБУ НИИЦПК имени Ю. А. Гагарина, 10 - 12 ноября 2015. С. 267 - 268.
  5. Zander V., Anken R. Short radius Centrifuge – A New approach for Life Science Experiments Under Hyper-g Conditions for Application in Space and Beyond / Recent Patents on Space Technology, 2013, 3. P 74-81.
  6. Галкин Р.А., Макаров И.В. Гравитационная терапия в лечении больных облитерирующими заболеваниями артерий нижних конечностей. Самара. 2006.198 с.
  7. Акулов В.А. Мехатронные системы генерации искусственной силы тяжести наземного и космического применения [под ред. Г. П. Аншакова]. М: Из-во Машиностроение. 2011. 161 с.
  8. Акулов В.А. Анализ и синтез систем медицинского назначения с управляемой искусственной силой тяжести: дисс. ... докт. техн. наук. Самара, 2013. 252 с.
  9. Мультиагентная технология синтеза эмпирических и теоретических моделей гемодинамики в среде искусственной гипогравитации / В.А. Акулов, И. В. Макаров, А. Ю. Сидоров, С. Н. Романова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19. №4. С 115 – 121.
  10. Короткорadiusная центрифуга как устройство для создания модельной гипогравитации Луны и Марса //XII Международная конференция «Пилотируемые полёты в Космос». НИИИ Центр подготовки космонавтов имени Ю. А. Гагарина, октябрь 2017.

**METHODOLOGY AND RESULTS OF RESEARCHES OF THE SYSTEM  
«PERSON – SHORT ARM HUMAN CENTRIFUGE» WITH IMITATION  
OF THE HYPOGRAVITATION OF THE MOON AND MARS**

© 2018 V.A. Akulov

Samara State Technical University

The research methodology of the “Person – Short Arm Human Centrifuge” systems designed to simulate the hypogravity factors of the Moon and Mars under ground conditions and to reveal the hidden patterns of human states is presented. The specificity and novelty of the methodology are: bi-directional research - manned cosmonautics and gravitational therapy; author’s informational and analytical system that provides calculation of individual modes of rotation depending on the purposefulness of the experiment; a combination of experimental and theoretical research methods with the construction of simplified mathematical models that are available to a wide range of users; two-point access for quantitative assessment of hemodynamics according to the “hand-ankle” scheme.

*Keywords:* hypogravitation of the Moon and Mars, the system “Person – Short Arm Human Centrifuge”, control, mathematical and computer modeling, peripheral hemodynamics