

УДК 629.785

**ИССЛЕДОВАНИЯ ВОПРОСОВ ПОДГОТОВКИ  
ЭКИПАЖЕЙ МЕЖПЛАНЕТНЫХ ЭКСПЕДИЦИЙ  
В ЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ****«ЧЕЛОВЕК – ЦЕНТРИФУГА ЦФ-18»****В.А. Акулов, В.Н. Киршанов, И.Н. Гаврик, В.А. Булгаков,  
Д.А. Беляев, И.А. Гришина, С.Н. Романова**

Докт. техн. наук, проф. В.А. Акулов (Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва)  
В.Н. Киршанов; И.Н. Гаврик; В.А. Булгаков; Д.А. Беляев; И.А. Гришина  
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)  
С.Н. Романова (Самарский государственный медицинский университет)

В статье изложены результаты начального этапа поисковых исследований по обоснованию и созданию прототипа тренажера, предназначенного для отбора, подготовки экипажей межпланетных экспедиций и исследования скрытых закономерностей системы кровообращения в среде гипогравитации Луны и Марса. Показано, что функциональные резервы длиннорadiusной центрифуги ЦФ-18 ЦПК имени Ю.А. Гагарина значительны и могут служить основой для создания действующего прототипа тренажера со встроенным автоматизированным рабочим местом врача по космической медицине. **Ключевые слова:** прототип многофункционального тренажера, сквозное моделирование факторов межпланетных экспедиций, гипогравитация Луны и Марса, мобильное автоматизированное рабочее место, центрифуга

**Issues of Training Interplanetary Expedition Crews within  
the Ergatic System “Human – TsF-18 Centrifuge”. V.A. Akulov,  
V.N. Kirshanov, I.N. Gavrik, V.A. Bulgakov, D.A. Belyaev,  
I.A. Grishina, S.N. Romanova**

The paper deals with the results of the initial stage of exploratory research for reasoning and creating the simulator prototype designed to select and train interplanetary expedition crews and study hidden patterns in the circulatory system in the hypogravity environment of the Moon and Mars. It is shown that the functional reserves of the TsF-18 long-radius centrifuge at the Gagarin CTC are significant to be the basis for creating an operating simulator prototype with a built-in automated working place for a space medicine doctor.

**Keywords:** multifunctional simulator prototype, end-to-end simulation of factors of interplanetary expeditions, hypogravity of the Moon and Mars, doctor’s mobile office, centrifuge

В соответствии с соглашением о научно-техническом сотрудничестве, заключенным между ЦПК имени Ю.А. Гагарина и Самарским национальным исследовательским университетом имени академика С.П. Королёва,

осуществляются поисковые исследования, предусматривающие разработку предложений по созданию нового поколения тренажеров для космонавтов на основе существующего оборудования и экспериментальную проверку их реализации. Актуальность исследований обусловлена рядом факторов. Прежде всего, существующие тренажеры, методы отбора и тренировки экипажей недостаточны для решения задач, связанных с подготовкой и осуществлением межпланетных миссий (дальний космос), так как они рассчитаны на орбитальные полеты. Необходимо значительное расширение функций тренажеров, учитывающих новые внешние факторы, которые, с одной стороны, существенно влияют на здоровье и работоспособность космонавтов, а с другой – отсутствуют не только на Земле, но и на Международной космической станции (МКС). Примером служит гипогравитация Луны и Марса [1–6].

В качестве основного подхода к достижению поставленных целей выбрано построение единой эргатической системы, ориентированной на решение следующих основных задач:

а) сквозное моделирование всего многообразия гравитационного воздействия на экипаж со стороны силовых полей, сопровождающих межпланетную экспедицию;

б) детальная диагностика состояний космонавтов с применением современных контактных и бесконтактных методов;

в) построение цифрового двойника гемодинамики;

г) воспроизведение атмосферы скафандров произвольного изготовителя (РФ, Китай, США и др.).

Сквозное моделирование факторов межпланетных экспедиций необходимо для построения и применения методологии отбора и тренировок экипажей в условиях, приближенных к реальным. Кроме того, моделирование обеспечит информационное сопровождение реального полета, а в случае возникновения нештатных ситуаций послужит средством анализа, выработки предложений по их устранению или снижению последствий.

Что касается медицинского обеспечения экспериментов, то оно требует существенной модернизации. Существует множество нерешенных задач и недостаточно изученных процессов жизнедеятельности человека (космонавта) в аномальных условиях. Примерами служат скрытые закономерности гемодинамики человека в условиях гипогравитации Луны и Марса, по своему воздействию приближенной к невесомости. Недостаточно исследована переносимость человеком многочисленных вариаций напряженности силовых полей (чередования перегрузок различной интенсивности, невесомости, гипогравитации) [1, 2, 5, 6]. Для решения перечисленных и им подобных задач предлагается высокоточное моделирование гипогравитации планет с применением новой информационно-аналитической системы (ИАС). В основу ИАС положен метод распределенных четырехполюсников, построенный на сочетании ультразвуковой доплерографии (УЗДГ) сосудов с измерением лодыжечно-плечевого индекса (ЛПИ). Такой подход обеспечивает

значительное расширение номенклатуры измеряемых медицинских показателей и служит основанием для построения цифрового двойника гемодинамики человека в Земных и аномальных условиях пребывания.

В результате выполнения первого этапа совместных исследований поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ технического потенциала центрифуги ЦФ-18 по воспроизведению многообразия силовых полей, сопровождающих межпланетную миссию.

2. Экспериментальная оценка однородности силового поля ЦФ-18 как модели гипогравитации Луны и Марса (адекватность модельного поля).

3. Организация мобильного автоматизированного рабочего места (АРМ) врача по космической медицине, встроенного в кабину «А» центрифуги ЦФ-18.

4. Отладка технологических процедур подготовки космонавтов, врача и его мобильного АРМ к сеансам вращения; настройки, отладки портативной медицинской аппаратуры и связи по каналу «кабина – операторы ЦФ-18»; построение системы безопасности врача.

5. Апробация мобильного АРМ врача в режиме моделирования гипогравитации Луны и Марса с выполнением процедур контактной диагностики состояний космонавтов (испытателей).

6. Формулировка направлений дальнейших исследований.

## **1. Анализ технического потенциала центрифуги ЦФ-18**

В качестве технического средства, обладающего необходимыми резервами для построения единой эргатической системы нового поколения, ориентированной на решение задач, связанных с освоением дальнего космоса, выбрана центрифуга ЦФ-18.

ЦФ-18 относится к классу длиннорADIUSных центрифуг с радиусом вращения –  $R = 18$  м, что придает ей ряд преимуществ по сравнению с центрифугами среднего и короткого радиуса (см. раздел 2. Однородность поля).

Система управления ЦФ-18 обеспечивает режим имитации гипогравитации Луны и Марса, потребный диапазон перегрузок составляет 0,17–0,45 единиц (располагаемый диапазон 0–12 единиц).

Кабина центрифуги имеет четыре степени свободы, что обеспечивает практически любую пространственную ориентацию вектора искусственной силы тяжести (ИСТ). Для имитации гипогравитации Луны и Марса достаточно две степени: разворот кабины на 180 град. в горизонтальной плоскости относительно исходного положения и собственное вращение консоли центрифуги.

Двухместная кабина со смежным расположением рабочих мест космонавтов (испытателей) существенно расширяет возможности ЦФ. Предлагаются два варианта комплектования экипажей тренажера: «космонавт

(испытатель) + космонавт (испытатель)», «космонавт (испытатель) + врач» (см. разделы 3–5). В первом варианте ускоряется процесс подготовки космонавтов (испытателей) и снижаются эксплуатационные расходы. Во втором – непосредственный контакт врача с космонавтом (испытателем) и наличие ИАС создают уникальные условия для исследования скрытых механизмов жизнедеятельности человека при имитации на ЦФ-18 невесомости, лунной и марсианской гипогравитации.

Кабина центрифуги оснащена системой измерения и регистрации физиологических параметров открытого типа и допускает расширение перечня измеряемых физиологических параметров, что важно для выявления скрытых механизмов гемодинамики и исследования пульсовой волны при контактной диагностике состояния космонавта (испытателя).

Таким образом, имеющиеся резервы ЦФ-18 достаточны для ее преобразования в действующий прототип тренажеров нового поколения, причем исключительно средствами параметрической модернизации, не требующими коренной модернизации.

## 2. Оценка однородности силового поля ЦФ-18

В связи с тем, что в качестве модели естественных силовых полей (ЕСП), сопровождающих межпланетные экспедиции, выбрано поле ИСТ, создаваемое центробежной машиной, особую значимость приобрела задача по оценке ее адекватности. Как широко известно, только в случае адекватности имеются достаточные основания для распространения результатов модельных исследований на реальную (моделируемую) систему. В отличие от полей планет (Земля, Луна, Марс), поле ИСТ неоднородно. Его напряженность зависит от радиуса плеча ЦФ-18. Для оценки однородности поля ИСТ, создаваемого центрифугой ЦФ-18, были разработаны и проведены эксперименты с измерениями перепада перегрузок в кабине по схеме «голова – колени» космонавтов (испытателей). Результаты измерений в координатах «время  $t$  – перегрузки  $g$ » приведены на интегральном графике рис. 1.

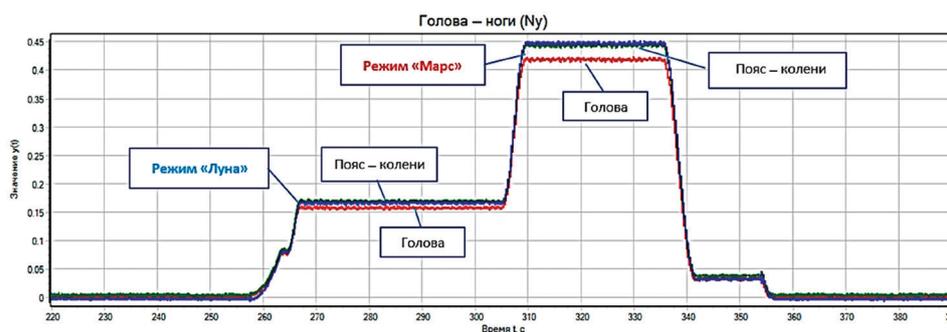


Рис. 1. Интегральный график измерений неоднородности силового поля

Как следует из рисунка, различие в напряженности силового поля ЦФ-18 для частей тела «пояс – колени» и «голова» не превышает  $0,02 g$  для режима «Луна» и  $0,025 g$  для режима «Марс» (время моделирования на графике (рис. 1) с 265 по 305 секунду и с 310 по 335 секунду соответственно), что свидетельствует о незначительной неоднородности поля ИСТ и доказывает его адекватность. Что касается структуры неоднородности, то она имеет вид  $N_{-4}^{+5} \%$ , где  $N$  – номинальное значение напряженности поля,  $+5 \%$  (нижняя часть тела: «пояс – колени»),  $-4 \%$  (верхняя часть тела: «голова – пояс»). Особо отметим, что полученный результат доказывает целесообразность, важность и реальность разработки системы сквозного моделирования факторов межпланетных экспедиций с последующей экстраполяцией данных медицинских экспериментов на реальные условия полета в дальнем космосе.

### **3. Медицинские аспекты дальнего космоса.**

#### **Мобильное автоматизированное рабочее место врача**

Совершенно очевидно, что на этапах, предшествующих межпланетным экспедициям, обладающим глубокой спецификой по сравнению с орбитальными полетами на МКС, следует выполнить многочисленные медицинские исследования, причем на новом технологическом уровне. Как указывалось, необходимо выявить скрытые закономерности периферической и центральной гемодинамики при длительном пребывании экипажа в условиях гипогравитации, которая по уровню напряженности близка к невесомости. Как известно, в условиях невесомости происходит атрофия мышечного аппарата нижних конечностей и детренированность (дезадаптация) вестибулярного аппарата. В отличие от МКС, где эта патология не является критической и проявляется только после возвращения на Землю, иная, более сложная ситуация возникает в среде гипогравитации. Как следствие незначительной напряженности полей, эффекты атрофии и детренированности будут проявляться значительно. Задача заключается в определении длительности и интенсивности процесса, т. е. длительности работоспособности космонавта, а вместе с ней продолжительности экспедиции.

В отличие от МКС, где перемещения осуществляются на небольшие расстояния (десятки метров) и с помощью рук, на поверхности планет нижним конечностям возвращается функция движителей. В процессе профессиональной деятельности космонавту потребуются действия, связанные со значительными физическими нагрузками. К ним относятся переходы на большие расстояния (километры) с удержанием позы «ортостаз», перемещение грузов (аппаратура, образцы грунтов, строительные материалы), преодоление сопротивления скафандра и т. п. Совершенно очевидно, что в отличие от МКС детренированность мышечного аппарата нижних конечностей и вестибулярного аппарата становится недопустимой.

Особой сложностью обладает обеспечение марсианской экспедиции. В частности, длительность перелета Земля – Марс, а следовательно,

пребывание в невесомости составляет 200–300 суток, атрофия и детренированность проявятся в полной мере. Необходима существенная модернизация процессов подготовки космонавтов и осуществление миссии с радикальным решением проблемы противодействия невесомости. В противном случае экспедиция теряет смысл.

Если на МКС выход в открытый космос осуществляется эпизодически со значительными временными интервалами, то на планетах (Луна, Марс) пребывание космонавта в скафандре становится практически ежедневным. Немаловажными вопросами являются выбор параметров атмосферы скафандра, испытания скафандров различных производителей (РФ, Китай, США и др.) с сопоставительным анализом их эффективности.

Обобщая изложенное, заключаем, что новое поколение тренажеров должно обеспечить решение новых медицинских задач и оценку эффективности найденных решений, причем в условиях, максимально приближенных к реальным. В результате поисковых исследований, выполненных на основе соглашения между ЦПК и Самарским университетом, предлагается решение, заключающееся в создании мобильного АРМ врача, установленного в кабину ЦФ-18 и оснащенного соответствующим оборудованием и технологиями.

#### **4. Разработка компоновочной схемы мобильного автоматизированного рабочего места врача**

Реализация предложения по созданию устанавливаемого в кабину ЦФ-18 мобильного АРМ врача потребовала выполнения первичных проектных, монтажно-наладочных работ и экспериментальной проверки достижимости поставленных целей. В связи с отсутствием ближайших аналогов было рассмотрено несколько компоновочных схем, согласующихся со спецификой кабины ЦФ, к которой относится ограниченное пространство, действие центробежного ускорения, обеспечение удобства и безопасности врача, размещение и фиксация дополнительной аппаратуры, необходимой для контактной диагностики, и т. д.

Мобильное АРМ врача устанавливается в правом отсеке кабины ЦФ-18. Врач располагается сидя в кресле, лицом ко входу. Перед ним на портативном столике устанавливается аппаратура УЗИ. Так как в кабине при вращении создается искусственное силовое поле, разработаны меры безопасности. Рабочее место и сам врач фиксируются быстроразъемными приспособлениями и страховочными ремнями. Для осуществления сканирования всей кровеносной системы человека («голова – ноги») предусмотрены две фиксированные позиции мобильного АРМ врача. Космонавт (испытатель) располагается в левом отсеке кабины, лежа на штатном кресле (ложементе) ЦФ-18.

Выбранная компоновка обладает рядом достоинств. Во-первых, сеансы вращения в таком варианте являются отлаженной процедурой, обеспеченной мерами безопасности. Во-вторых, в кресло вмонтированы «штатные»

средства дистанционного медицинского контроля, аудио- и видеосвязи. В-третьих, средства контроля допускают расширение их функциональных возможностей. В-четвертых, штатные системы обладают высокой технологичностью. Под этим понимается минимизация трудоемкости при переконфигурации кабины, а также возможность адаптации к решению новых задач, которые могут возникнуть в процессе проведения исследований (экспериментов). Примером служит проработка процедур поэтапной реабилитации космонавтов после возвращения на Землю в среде гипогравитации Марса как промежуточной стадии.

### 5. Апробация мобильного автоматизированного рабочего места врача в условиях вращения центрифуги ЦФ-18

Как следует из предыдущих разделов, в результате параметрической модернизации получены новые технические решения. Задействованы оба рабочих места кабины, в кабину установлено мобильное АРМ врача с исследовательским оборудованием – ультразвуковой доплерографический аппарат (портативный) нового поколения, что потребовало оценки эффективности принятых решений и достижимости планируемых результатов. Структурная схема мобильного АРМ врача представлена на рис. 2. Для этого была разработана и реализована программа отладочных испытаний, включающая в себя апробацию технологии подготовки участников экспериментов и аппаратуры к сеансам вращения, с воспроизведением гипогравитации Луны, Марса и, что особенно важно, с выполнением процедур контактной диагностики.

В качестве одной из иллюстраций на рис. 3 показан стоп-кадр полиэкрана контрольного монитора, установленного в пультовой центрифуги ЦФ-18. На нем в реальном времени отображаются оба участника экспериментов, находящиеся в кабине ЦФ-18, вид на центрифугу со стороны пульта управления и текущий график перегрузок вида  $g = g(t)$ . Представленный стоп-кадр получен при воспроизведении гипогравитации Марса (см. область 4).

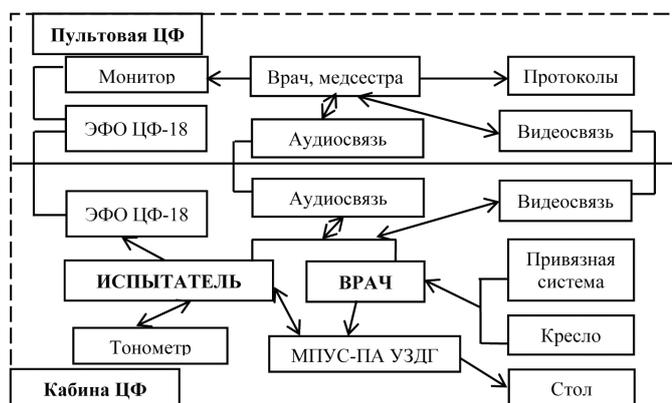


Рис. 2. Структурная схема мобильного АРМ врача



Рис. 3. Стоп-кадр экрана контрольного монитора главного оператора

Наиболее важные из результатов, полученных при отладке мобильного АРМ врача в кабине ЦФ-18, состоят в следующем:

- 1) доказано, что, несмотря на действие центробежного ускорения, врач способен выполнять значительные по объему исследования, которые ранее были недоступны;
- 2) разработана и отлажена система безопасности врача;
- 3) мобильное АРМ врача в кабине ЦФ-18 обеспечивает выполнение возложенных на него функций и готово к эксплуатации.

## Выводы

1. В соответствии с соглашением о сотрудничестве, заключенным между ЦПК имени Ю.А. Гагарина и Самарским национальным исследовательским университетом имени академика С.П. Королёва, осуществляются поисковые исследования, предусматривающие формулировку предложений по созданию нового поколения тренажеров космонавтов, предназначенных для решения задач, связанных с освоением дальнего космоса, экспериментальной проверке их реализуемости, модернизации электронного и физиологического оборудования ЦФ-18 и применение современных портативных медицинских диагностических комплексов (систем).

2. Выполнен анализ технического потенциала центрифуги ЦФ-18 по воспроизведению многообразия силовых полей, сопровождающих межпланетную миссию, показавший, что располагаемые ресурсы достаточны для создания действующего прототипа тренажера нового поколения. Для приведения их в действие не требуется масштабная модернизация. Достаточно выполнить параметрическую модернизацию, т. е. поднастройку систем ЦФ-18, и переоборудование кабины (кабин).

3. Выполнена оценка однородности силового поля ЦФ-18 как модели гипогравитации Луны и Марса. Установлено, что модельное поле адекватно силовым полям планет. Неоднородность поля незначительна, не превышает по величине  $0,025 g$ , что является явным преимуществом ЦФ-18 перед аналогами и, прежде всего, перед центрифугами короткого радиуса, на которых неоднородность достигает 100 %.

4. Для повышения эффективности ЦФ-18, как технического средства космической медицины, предложено разместить в ее кабину современное мобильное АРМ врача. Предусмотрено значительное расширение номенклатуры измеряемых параметров за счет новых технологий, включая технологию распределенных четырехполосников (сочетание контактного УЗДГ и ЛПИ (два тонометра)), что важно для детальной диагностики состояния космонавтов в условиях, приближенных к реальным.

5. Выполнен монтаж мобильного АРМ врача, проведена его отладка в двухместном варианте («космонавт (испытатель) – врач») с воспроизведением гипогравитации Луны и Марса. Доказано, что центробежная сила не препятствует выполнению врачом диагностических процедур и что мобильное АРМ врача готово к проведению дальнейших экспериментальных исследований.

6. Намечено формирование плана исследований на ближайшую перспективу, предполагающего выполнить:

6.1. Опытную эксплуатацию устанавливаемого в двухместную кабину ЦФ-18 мобильного АРМ врача с выполнением медицинских исследований в режиме «гипогравитация Луны и Марса» (5–7 «космонавтов (испытателей)»).

6.2. Разработку и реализацию программы медицинских исследований с учетом предложений врачей ЦПК (см. подп. 6.1).

6.3. Проработку вариантов реабилитации космонавтов с применением вращения на ЦФ-18 в режиме «гипогравитация Марса» в качестве промежуточного этапа при переходе от невесомости к земной гравитации.

6.4. Разработку и адаптацию вариантов тренировки экипажей с применением виртуальной системы управления луноходом (совместно с Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова) в режиме «гипогравитация Луны».

6.5. Модернизацию системы управления газовым составом кабины под решение задач освоения дальнего космоса.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Котовская, А.Р. Проблема создания искусственной силы тяжести с помощью центрифуги короткого радиуса для медицинского обеспечения межпланетных пилотируемых полетов / А.Р. Котовская, И.Ф. Виль-Вильямс, В.Ю. Лукьянюк // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2003. – Т. 37. – № 5. – С. 36–39.

- [2] Лебедев, В.В. Моделирование полета на Марс / В.В. Лебедев // Вестник Российской академии наук. – 2010. – Т. 80. – № 11. – С. 1000–1004.
- [3] Долгов, П.П. Направления исследований и задачи подготовки космонавтов на центрифугах в интересах перспективных космических программ / П.П. Долгов, В.Н. Киршанов, И.Н. Гаврик // Материалы XIII Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос». – 2019. – С. 205–206.
- [4] Долгов, П.П. Основные направления работ на центрифугах и их целевого применения / П.П. Долгов, В.Н. Киршанов, А.П. Чудинов // Материалы XI Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос», посвященной 55-летию ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», 10–12 ноября, 2015. – С. 267–268.
- [5] Акулов, В.А. Анализ и синтез систем медицинского назначения с управляемой искусственной силой тяжести: специальность: 05.11.17 «Приборы, системы и изделия медицинского назначения»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / В.А. Акулов; Самарский государственный технический университет. – Самара, 2013. – 252 с. – Место защиты: Пенз. гос. ун-т. – Текст: непосредственный.
- [6] Zander, V. Short radius Centrifuge – A New approach for Life Science Experiments Under Hyper-g Conditions for Application in Space and Beyond / V. Zander, R. Anken // Recent Patents on Space Technology. – 2013. – No 3. – P. 74–81. DOI: 10.2174/18776116112029990014

## REFERENCES

- [1] Kotovskaya, A.R. The Problem of Creation of Artificial Gravity with the Use of a Short-Arm Centrifuge Within the Medical Support System in Interplanetary Piloted Missions / Kotovskaya A.R., Wil-Williams I.F., Lukyanuk V.Yu. // Aerospace and Environmental Medicine. – 2003. – Vol. 37. – No 5. – P. 36–39.
- [2] Lebedev, V.V. Simulation of a Flight to Mars in Low Earth Orbit / V.V. Lebedev // Bulletin of the RAS. – 2010. – Vol. 80. – No 11. – P. 1000–1004.
- [3] Dolgov, P.P. Directions of Research and Tasks of Training Cosmonauts on Centrifuges for Advanced Space Programs / P.P. Dolgov, V.N. Kirshanov, I.N. Gavrik // Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference “Manned Space Flights”. – 2019. – P. 205–206.
- [4] Dolgov, P.P. The Main Areas of Work on Centrifuges / P.P. Dolgov, V.N. Kirshanov, A.P. Chudinov // Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference “Manned Space Flights”, devoted to the 55<sup>th</sup> Anniversary of the Yu.A. Gagarin Test&Research CTC, November 10–12, 2015. – P. 267–268.
- [5] Akulov, V.A. Analysis and Synthesis of Medical Systems with Controlled Artificial Gravity: specialty: 05.11.17 “Devices, systems and products of medical purpose”: thesis abstract for the degree of Doctor of Technical Sciences / V.A. Akulov // Samara State Technical University. – Samara, 2013. – 252 p. – Place of thesis defense: Penza State University. – Text: direct.
- [6] Zander, V. Short radius Centrifuge – A New approach for Life Science Experiments Under Hyper-g Conditions for Application in Space and Beyond / V. Zander, R. Anken // Recent Patents on Space Technology. – 2013. – No 3. – P. 74–81. DOI: 10.2174/18776116112029990014