

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ
ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ
ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НА ЦЕНТРИФУГЕ
УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ ЛУНОХОДА**

П.П. Долгов, В.Н. Киршанов, Е.Ю. Иродов, И.Н. Гаврик,
В.С. Коренной, Ю.И. Онуфриенко, А.П. Чудинов, О.Б. Иващук,
А.Н. Беляев, И.А. Гришина, С.Н. Белявцев, Д.А. Беляев,
А.В. Булгаков, В.В. Швецов, Р.Р. Каспранский, А.С. Заверюха,
И.В. Коновалова, П.Ю. Сухочев, В.В. Латонов, Г.С. Бугрий,
В.А. Чертополохов

Канд. техн. наук, ст.н.с. П.П. Долгов; В.Н. Киршанов; канд. техн. наук, ст.н.с. Е.Ю. Иродов; И.Н. Гаврик; канд. техн. наук, ст.н.с. В.С. Коренной; канд. техн. наук Ю.И. Онуфриенко; А.П. Чудинов; О.Б. Иващук; А.Н. Беляев; И.А. Гришина; С.Н. Белявцев; Д.А. Беляев; А.В. Булгаков; В.В. Швецов; канд. мед. наук, ст.н.с. Р.Р. Каспранский; А.С. Заверюха; И.В. Коновалова (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина») П.Ю. Сухочев; канд. физ.-мат. наук В.В. Латонов; Г.С. Бугрий; В.А. Чертополохов (МГУ имени М.В. Ломоносова)

В статье представлены результаты экспериментальных исследований возможностей применения средств виртуальной реальности для имитации управления космонавтом луноходом в кабине центрифуги ЦФ-18. Экспериментально подтверждена возможность использования средств виртуальной реальности в кабине центрифуги ЦФ-18, работоспособность этих средств и возможность комфортного размещения оператора в шлеме виртуальной реальности в кабине центрифуги ЦФ-18. Результаты исследований подтвердили выполнимость управления движением центрифуги для моделирования условий движения лунохода по сложному рельефу лунной поверхности. Данные объективного контроля и субъективной оценки испытуемых показали, что в большинстве экспериментов испытуемый имел возможность комфортного управления луноходом.

Ключевые слова: подготовка космонавтов, луноход, центрифуга, операторская деятельность, управление луноходом, виртуальная реальность.

Experimental Studies of the Potential Use of Virtual Reality Systems When Modeling the Lunokhod Controlled Movement on the Centrifuge. P.P. Dolgov, V.N. Kirshanov, E.Yu. Irodov, I.N. Gavrik, V.S. Korennoy, Yu.I. Onufrienko, A.P. Chudinov, O.B. Ivashchuk, A.N. Belyaev, I.A. Grishina, S.N. Belyavtsev, D.A. Belyaev, A.V. Bulgakov, V.V. Shvetsov, R.R. Kaspranskiy,

A.S. Zaveryukha, I.V. Konovalova, P.Yu. Sukhochev, V.V. Latonov, G.S. Bugriy, V.A. Chertopolokhov

The paper presents results of experimental studies of the potential use of virtual reality tools in the TsF-18 centrifuge's cabin to simulate the controlling of the lunokhod by a cosmonaut. The possibility to use the virtual reality tools in the TsF-18 centrifuge's cabin, operability of these tools and wearing comfort of the virtual reality helmet for an operator were experimentally confirmed. Tests performed confirm the feasibility of controlling the centrifuge's motion in order to simulate the lunokhod movement over the difficult lunar surface. Objective experimental data and subjective assessments show that in most tests an operator was able to control the lunokhod comfortably.

Keywords: cosmonaut training, lunokhod, centrifuge, operator activity, control of lunokhod, virtual reality.

Постановка задачи

Новые задачи космических полетов и условия работы космонавтов при реализации будущей отечественной лунной программы определяют ряд специфических проблем, которые необходимо учитывать при проведении подготовки космонавтов, а также требуют новых подходов при разработке и создании технических средств подготовки космонавтов (ТСПК). Например, задачу подготовки космонавтов к управлению луноходом на поверхности Луны предлагается отрабатывать в том числе с использованием средств виртуальной реальности [1].

На тренажере эффект от визуализации виртуального окружения вокруг космонавта должен синхронно дополняться моделированием динамических факторов движения лунохода.

В большинстве известных проектов имитаторов (по сути, прототипов тренажеров) управления луноходом с использованием средств виртуальной реальности (ВР) космонавт, как правило, не получает физического отклика (в виде ускорения, перегрузки, изменения угла наклона и т.п.) от своих управляющих воздействий. Это может сформировать у него неверный алгоритм (стереотип) управления луноходом, что приводит к некачественному выполнению целевых операций, а также к опасности повреждения лунохода или причинения вреда здоровью космонавта.

Один из возможных подходов к решению этой проблемы на виртуальных тренажерах – использование подвеса.

Для принятия решения об использовании центрифуги ЦФ-18 в качестве подвижного основания для тренажера [2] необходимо провести исследования по следующим направлениям:

– определение существующих ограничений при технической реализации использования средств ВР в кабине центрифуги. Ограничения могут быть обусловлены объемом кабины центрифуги, параметрами имеющихся линий связи между кабиной центрифуги и оборудованием вне кабины;

– определение возможностей комфортного размещения и работы космонавта при управлении виртуальным луноходом в кабине центрифуги.

Целесообразность этих исследований обусловлена также тем, что при тренировках на центрифугах могут возникать ложные ощущения движения из-за негативного воздействия ускорения Кориолиса на вестибулярный аппарат человека при движении головой во время вращения центрифуги. Однако этот вывод был сделан по результатам вращения на «самолетном» тренажере на стенде Desdemona с радиусом плеча менее 4 метров [3]. Центрифуга ЦФ-18 имеет радиус плеча, равный 18 метрам, поэтому целесообразно исследовать в реальных условиях воздействие ускорения Кориолиса на вестибулярный аппарат космонавта.

Требуется определить, возможно ли моделировать управление луноходом на различных участках рельефа лунной поверхности при помощи различных режимов вращения центрифуги в комплексе с VR оборудованием.

Состояние вопроса

Исследования по применению средств виртуальной реальности в кабине центрифуги ЦФ-18 ранее не проводились. ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» (ЦПК) совместно с МГУ имени М.В. Ломоносова начали предварительные исследования по данному вопросу в 2018 году. С этой целью лаборатория математического обеспечения имитационных динамических систем (МОИДС) МГУ предоставила оборудование, разработанное ранее для экспериментов по управлению виртуальной моделью лунохода на динамическом стенде, структурная схема которого показана на рисунке 1. Было предложено провести проверку возможности размещения этих средств в кабине центрифуги ЦФ-18, а также их работоспособности при различных величинах и направлениях перегрузок.

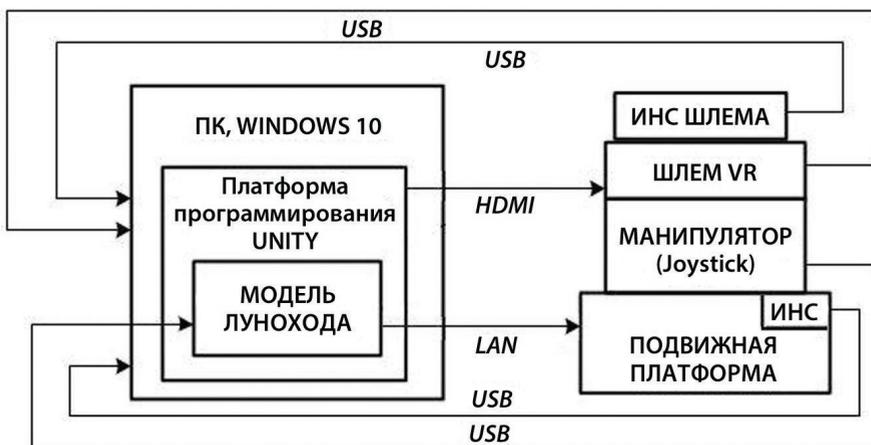


Рис. 1. Структурная схема «лунохода» лаборатории МОИДС

Результаты этих исследований частично опубликованы в материалах XIII Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос» [4, 5, 6, 7, 8]. В настоящей статье представлены новые развернутые и систематизированные данные, полученные при проведении экспериментальных исследований возможностей применения средств ВР для имитации управления космонавтом луноходом с использованием центрифуг.

Состав программно-аппаратных средств и характеристика оборудования, используемого для реализации технологии ВР на динамическом стенде

Для проведения исследований на центрифуге ЦФ-18 в качестве основных средств ВР применялось оборудование динамического стенда МОИДС:

- портативная графическая станция;
- шлем виртуальной реальности;
- манипулятор (геймпад);
- отдельный модуль – инерциально-навигационная система (ИНС).

Программное обеспечение виртуального лунохода (ВЛ) создано с использованием платформы для разработки приложений реального времени UNITY, установленной на ноутбук MSI GP72MVR 7REX Leopard Pro в следующей комплектации: IntelCore i7, 16Gb DDR4, SSD 250Gb, LAN 1000Mbit/s, NVIDIA GTX 1070. Масса ноутбука – 2,7 кг, габаритные размеры (Ш x Г x В) – 419 x 287 x 32 мм (рис. 2).

Управление ВЛ производится посредством манипулятора Logitech F310 Gamepad, подключенного к ПК через USB-контроллер (рис. 3).



Рис. 2. Портативная графическая станция



Рис. 3. Манипулятор (геймпад)

Положение головы оператора (положение шлема) отслеживается блоком инерциальных датчиков, закрепленным внутри шлема виртуальной реальности (ШВР) и блоком на подвижной платформе. В обоих блоках используются малогабаритные ($3 \times 3 \times 1$ мм) MEMS-модули типа MPU-9250 (рис. 4). Это многочиповый модуль (MCM), состоящий из двух матриц, интегрированных в один корпус типа QFN. Одна матрица содержит трехосевой датчик угловых скоростей и трехосевой акселерометр. В другой матрице находится трехосевой магнитометр AK8963. Модуль также содержит датчик температуры и процессор. Разработанное в МГУ имени М.В. Ломоносова программное обеспечение INS Server позволяет компенсировать дрейв датчиков при работе в кабине центрифуги.

Один блок инерциальных датчиков установлен внутри ШВР, второй закреплен на кресле оператора.

Информация с инерциальных датчиков передается через интерфейс USB в модель для формирования соответствующего видеоизображения. Питание датчиков также производится через разъем интерфейса USB. Процесс обработки данных, поступающих с инерциальных датчиков, включает в себя решение дифференциальных уравнений. При этом ошибки оценки координат отслеживаемого объекта (головы) накапливаются со временем, что и является основным недостатком систем инерциального трекинга.

Видеоизображение через интерфейс HDMI передается на ШВР Total-Vision VR2 (рис. 5).

Кресло оператора ВЛ находится на подвижной платформе опорного типа.

Изображение в ШВР для оператора дополняется динамической имитацией вектора кажущегося ускорения. Для этого из модели лунохода в систему

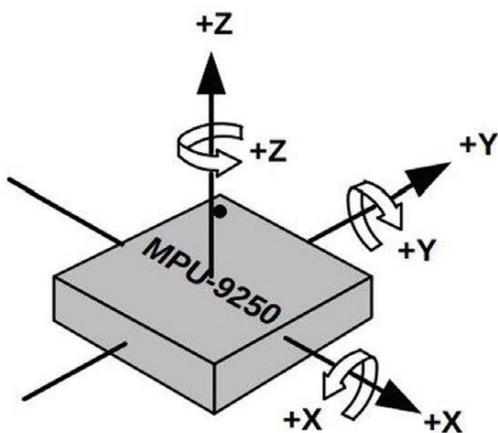


Рис. 4. Плата инерциально-навигационной системы



Рис. 5. Шлем виртуальной реальности

управления платформой передаются необходимые заданные угловые положения платформы (тангажа и крена), обеспечивающие необходимую ориентацию вектора кажущегося ускорения. Модуль ускорения при этом не меняется и остается равным ускорению свободного падения.

Для адаптации комплекта средств ВР с динамического стенда к работе на центрифуге ЦФ-18 выполнена разработка канала связи ВЛ с системой управления центрифуги. Функционально-структурная схема канала связи модели лунохода с системой управления центрифуги представлена на рисунке 6.

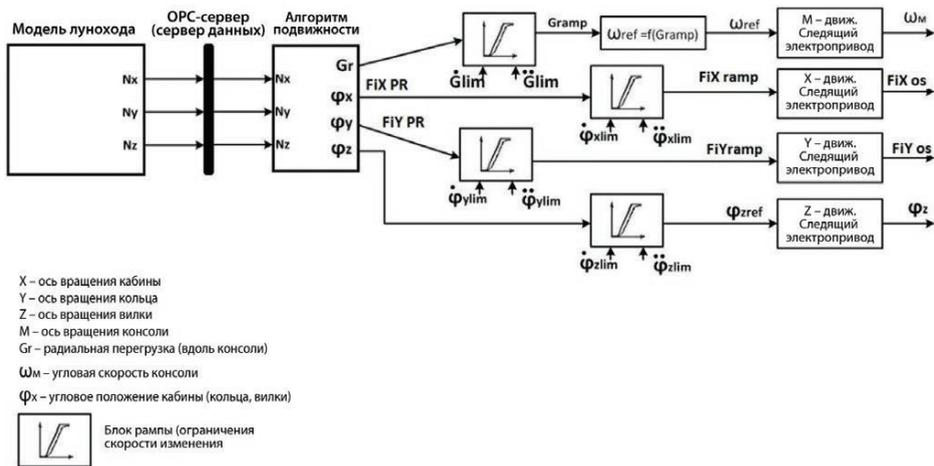


Рис. 6. Функционально-структурная схема канала связи модели лунохода с системой управления центрифуги

Результаты экспериментальных исследований оборудования

С целью проверки возможности размещения комплекта средств ВР (используемого на динамическом стенде лаборатории МОИДС) в кабине ЦФ-18 и его работоспособности при различных перегрузках была проведена серия экспериментов.

Проверка работоспособности персонального компьютера в кабине центрифуги ЦФ-18 была проведена при воздействии перегрузки в разных направлениях.

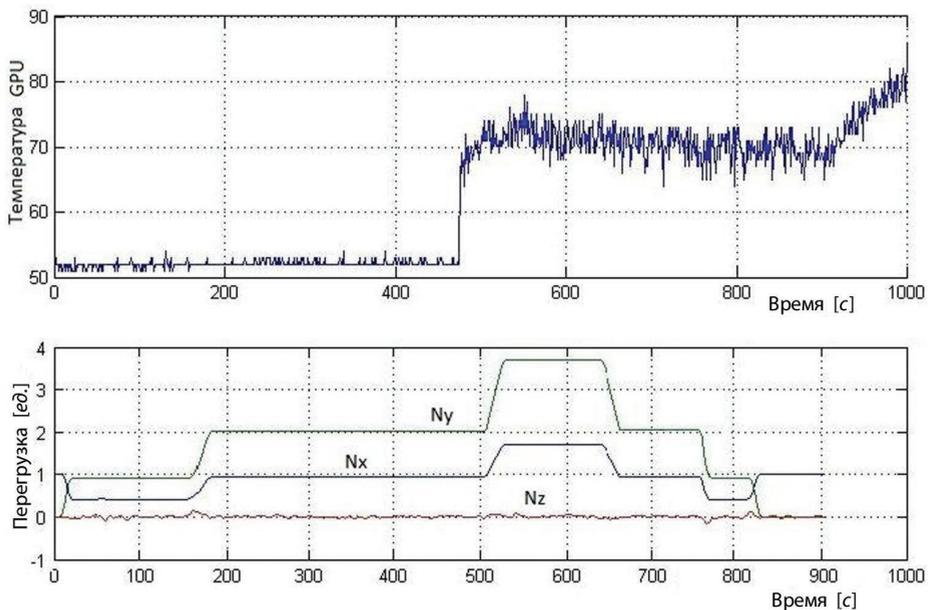
В кабине центрифуги на левом кресле на мягкой подложке эластичными стяжками был закреплен ноутбук MSI и манипулятор управления (рис. 7). Питание ноутбука производилось от внутренней аккумуляторной батареи. ШВР был закреплен на офтальмологической дуге на правом кресле в кабине центрифуги. На ноутбуке была запущена программа моделирования движения лунохода и встроенная в операционную систему программа контроля и регистрации в файл значений температуры центрального (CPU) и графического (GPU) процессоров.



Рис. 7. Размещение ноутбука и ШВР в кабине ЦФ-18

Нагрузка на процессоры возникала из-за необходимости пересчета видеоизображения в ШВР при вращении консоли (М-движения) центрифуги, а также за счет ухудшения условий работы охлаждающих вентиляторов от воздействия перегрузки в разных направлениях при изменении угловых положений колец карданова подвеса.

Контроль работы графической станции выполнялся посредством передачи изображения с дисплея ноутбука на монитор, размещенный в пультовой комнате ЦФ-18. Проверка проводилась при радиальных перегрузках 0,0; 2,0 и 4,0 единицы, угол наклона спинки кресла испытателя составлял 25 градусов от вертикали. График изменения температуры графического процессора (видеокарты) на фоне проекций вектора перегрузки представлен на рисунке 8.

Рис. 8. График изменения температуры процессора видеокарты на фоне проекций N_x , N_y , N_z вектора перегрузки

В результате проверки установлено, что при перегрузках до 4 *ед.* графическая станция сохраняет работоспособность в кабине центрифуги. Температура центрального процессора при работе ПК в кабине ЦФ в условиях воздействия перегрузки увеличилась не более, чем на 5 % по сравнению с обычными условиями, что не превышает допустимые условия эксплуатации ($T_{\text{крит CPU}} = 94\text{ }^{\circ}\text{C}$ согласно данным, приведенным на сайте производителя). Температура графического процессора также не приблизилась к критическим значениям ($T_{\text{крит GPU}} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ согласно данным, приведенным на сайте производителя), однако после работы под перегрузкой через 500 секунд зафиксирован резкий, почти 20 градусов, рост температуры. Можно предположить, что это вызвано «заклиниванием» вентилятора или перекрытием вентиляционных отверстий ноутбука крепежными ремнями. Тем не менее, после трех минут работы под перегрузкой 4 *ед.* температура не достигла значений, близких к критическим. (По данным производителей $T_{\text{крит CPU}} = 94\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{GPU} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. CPU автоматически снижает тактовую частоту при нагреве $85\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Для определения возможностей передачи данных для задач управления ВЛ в реальном времени было проведено тестирование пропускной способности канала связи между кабиной и пультовой центрифуги ЦФ-18 в статическом состоянии и в режимах поворотов консоли и кабины, кольца и вилки.

Для проведения экспериментов использовались: ноутбук MSI GP72MVR 7RFX LeopardPro (ПК1) и ноутбук DELL Inspiron 5565 LenovoThinkPad X220 (ПК2), расположенные в кабине ЦФ-18 (ПК1) и пультовой ЦФ-18 (ПК2), которые объединили в локальную сеть при помощи штатной линии связи между кабиной и пультовой (рис. 9).

Штатная линия связи представляет собой два модема-усилителя Ethernet с выходами 100 Мбит/с (гнезда RJ-45) и соединенные кабелем RG-140U (длиной 40 м – от кабины до щита под центрифугой) и кабелем RG-59U (длиной 80 м – от щита под центрифугой до пультовой) аналоговой передачи данных.

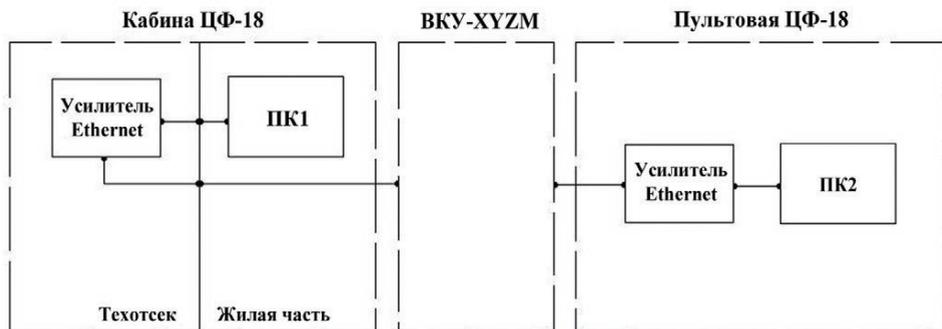


Рис. 9. Структурная схема проверяемого канала связи

При помощи программы LANSpeedTest, запущенной на ПК2, проведено тестирование пропускной способности канала связи путем передачи файла данных объемом 1 Гб при различных режимах работы центрифуги ЦФ-18, а также тест стабильности пакетной передачи данных:

а) статический режим с выключенным силовым оборудованием для исключения возможного влияния электромагнитных полей;

б) статический режим с включенным силовым оборудованием вспомогательных движений центрифуги;

с) динамический режим с вращением вспомогательных движений со следующими параметрами: X-движение – 30 град/с, Y-движение – 10 град/с, Z-движение – 10 град/с;

д) динамический режим основного вращения со следующими параметрами: перегрузка 1, 2, 4 ед. с площадками произвольной длительности, вспомогательные движения в режиме ориентации Y-движения.

Параметры времени и скорости передачи данных оценивались на основе передачи файла размером 1 Гб.

Параметры стабильности пакетной передачи данных и задержки передачи пакета данных оценивались на основе передачи 77 пакетов данных, каждый из которых был размером 16 384 байт.

Диаграммы зависимости некоторых параметров передачи сигналов от режима работы центрифуги представлены на рисунках 10–13.

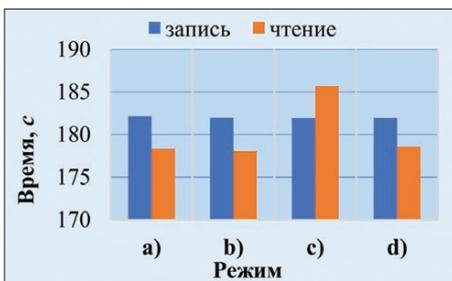


Рис. 10. Время передачи данных (файл 1 Гбайт)

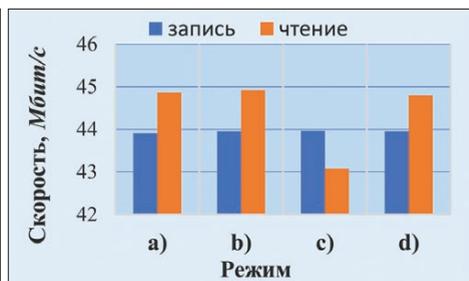


Рис. 11. Скорость передачи данных (файл 1 Гбайт)

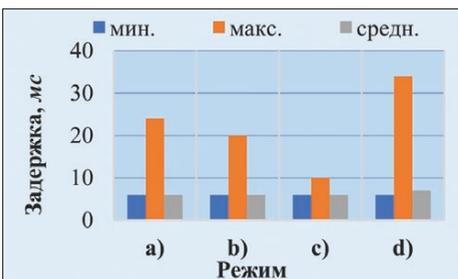


Рис. 12. Задержка передачи одного пакета 16 384 байт

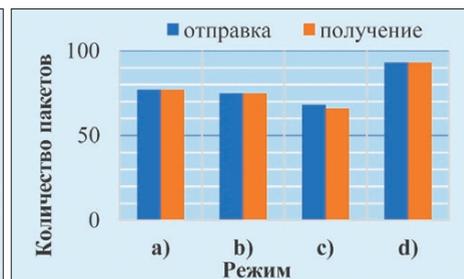


Рис. 13. Количество пакетов данных по 16 384 байт

В результате тестирования пропускной способности канала связи между кабиной и пультуевой центрифуги ЦФ-18 установлено, что:

– существующая конфигурация сетевого соединения пригодна для применения в качестве надежного и стабильного средства передачи данных модуля и ориентации вектора перегрузки в реальном времени для полунатурного моделирования движения лунохода;

– недостаточная скорость соединения и значительная величина задержек, вызванных ЦАП–АЦП преобразованием, не позволяют транслировать с устройств, расположенных вне кабины ЦФ-18 в шлеме виртуальной реальности, изображение с минимальными для комфорта и отсутствия болезни движения задержками;

– высокое качество коаксиальных кабелей и скользящих контактов позволит в дальнейшем модернизировать систему передачи данных и достичь за счет применения современных высокоскоростных устройств более высокую скорость передачи данных со значительно меньшими задержками.

Проведено исследование вариантов размещения испытателя в кресле кабины центрифуги ЦФ-18.

В целях обеспечения безопасности испытателя в кабине центрифуги во время вращений и испытаний, испытатель укладывается и фиксируется привязной системой в штатном регулируемом кресле ASEA (рис. 14) во избежание получения травм.

Кресло ASEA имеет возможность регулировки позы испытуемого от положения «сидя» до положения «лежа». Для проведения экспериментов были подобраны следующие положения регулировок: бедро – 72° , голень – 72° , подлокотники – 3 метка (66°), заголовник – 5° , офтальмологическая дуга – 75° .

Привязная система обеспечивает фиксацию испытателя в кресле четырехточечным ремнем для груди и плеч. Фиксация ног осуществляется ремнями для голени и ступней, на голову испытателя надевается мягкий защитный шлемофон испытателя. Затяжка ремней осуществляется таким образом, чтобы испытатель не имел свободных движений телом и ногами в кресле, между телом испытателя и подушками кресла не оставалось зазора.



Рис. 14. Расположение испытателя в кресле ASEA кабины ЦФ-18

В процессе исследований определено, что данное кресло полностью обеспечивает безопасное и комфортное расположение испытателя в кабине центрифуги с комплектом средств ВР. Проверено, что ремни привязной системы обеспечивают достаточное крепление испытателя в кресле, высокие борта и подлокотники устраняют боковые движения испытателя при переворотках кабины.

Связь между пультовой и кабиной центрифуги осуществляется с помощью двусторонней аудио- и видеосвязи.

Программа и методика экспериментальных исследований с испытателями в кабине центрифуги ЦФ-18 с использованием средств виртуальной реальности

Для проведения исследований была разработана специальная программа, в которой были определены следующие цели исследований:

- оценить степень негативного воздействия ускорения Кориолиса, возникающего при движении головой во время вращения центрифуги с радиусом плеча 18 метров (ЦФ-18) и воздействующего на вестибулярный аппарат человека, решающего задачу управления объектом в виртуальной среде;
- отработать технологии для создания динамического стенда с применением средств виртуальной реальности в кабине центрифуги ЦФ-18.

В кабине центрифуги кроме штатного оборудования была установлена графическая станция с подключенными к ней ШВР, инерциальными датчиками и управляющим манипулятором (геймпадом). Графическая станция по сети Ethernet связана с контроллером системы управления центрифуги. В пультовой комнате ЦФ-18 установлен отдельный компьютер, функционально являющийся «пультом инструктора» при проведении эксперимента.

Во время исследований на испытателя накладывались датчики медицинского пояса и обеспечивалась возможность врачу в реальном времени контролировать кардиограмму оператора по трем отведениям.

В процессе проведения исследований проводилось два вида экспериментов, методики выполнения которых представлены ниже.

Эксперимент 1 – субъективная оценка ощущений ускорения Кориолиса при пассивном наблюдении испытателем окружающей обстановки в ШВР во время вращения центрифуги ЦФ-18.

Порядок проведения эксперимента:

- в кабине центрифуги в кресле размещается испытатель;
- на голову испытателя надет ШВР, через который в поле зрения испытателя передается видеоизображение;
- кабина центрифуги поворачивается таким образом, чтобы испытатель находился в положении «сидя» с наклоном спинки кресла назад на 15 градусов;

– в поле зрения испытателя передается неподвижное изображение окружающей обстановки (поверхность Луны);

– производится вращение центрифуги с радиальными перегрузками 0,1; 0,5; 1,0; 1,4; 1,0; 0,5; 0,1 единиц в режиме сохранения начального направления воздействия результирующего вектора перегрузки – 15 градусов относительно спинки кресла;

– скорость изменения перегрузки – 0,1 *ед./с*, время удержания на «площадке» – до 30 секунд по желанию испытателя;

– с началом движения центрифуги изображение в поле зрения испытателя становится подвижным – для глаз моделируется движение вперед по прямой линии, скорость движения изображения (набегания картинка) пропорциональна величине перегрузки;

– испытатель в процессе эксперимента поворачивает голову в стороны, наблюдая движущееся изображение, и субъективно оценивает собственные вестибулярные ощущения при каждом значении перегрузки.

Эксперимент 2 – субъективная оценка ощущений ускорения Кориолиса при решении испытателем целевой задачи – управления ВЛ в условиях моделирования акселерационной обстановки в кабине центрифуги ЦФ-18.

Порядок проведения эксперимента:

– в кабине центрифуги в кресле размещается испытатель;

– на голову испытателя надет ШВР, через который в поле зрения испытателя передается видеоизображение;

– кабина центрифуги поворачивается таким образом, чтобы испытатель находился в положении «сидя» с наклоном спинки кресла назад на 15 градусов;

– в поле зрения испытателя передается неподвижное изображение элементов лунохода и окружающей обстановки (поверхности Луны) за иллюминаторами;

– испытатель выполняет целевую задачу – управление движением ВЛ на поверхности Луны по маршруту, содержащему участки с наклонами в горизонтальной и боковой плоскостях, повороты, развороты, прямолинейные участки;

– визуальное моделирование движения лунохода дополняется динамическим моделированием акселерационной обстановки в кабине центрифуги, при этом модуль вектора перегрузки при моделировании остается постоянным, а направление вектора изменяется в зависимости от движения лунохода;

– исследования производятся на перегрузках по модулю – 1,0 (статика); 1,005; 1,41; 1,73; 1,41; 1,005 единиц, что соответствует радиальным перегрузкам 0,1; 1,0; 1,4; 1,0; 0,1 единиц, скорость изменения перегрузки при переходе на другую величину модуля – 0,1 *ед./с*, после перехода на другую величину модуля перегрузки целевая задача загружается сначала;

- испыталитель в процессе эксперимента субъективно оценивает собственные вестибулярные ощущения при управлении луноходом при разных значениях действующего модуля перегрузки;
- общая длительность одного эксперимента – до 10 минут.

Результаты экспериментальных исследований возможностей управления испыталителями виртуальным луноходом на центрифуге ЦФ-18

В процессе проведения экспериментов проводилась непрерывная регистрация видеоизображений, физиологических параметров испыталителей, стенограмм комментариев испыталителей по самоощущениям.

После выполнения экспериментов испыталители заполняли три вида анкет:

- а) по системам виртуальной реальности;
- б) по симуляторной болезни;
- в) по оценке эффектов моделирования перемещения на луноходе в сочетании виртуальной реальности с воздействием ускорений на ЦФ-18.

Некоторые результаты анкетирования представлены в виде диаграмм на рисунках 15–17.

По осям ординат на диаграммах показаны предлагаемые в анкетах ответы на вопросы. Легенды на представленных диаграммах для компактности представляют сокращенные вопросы из соответствующих анкет.

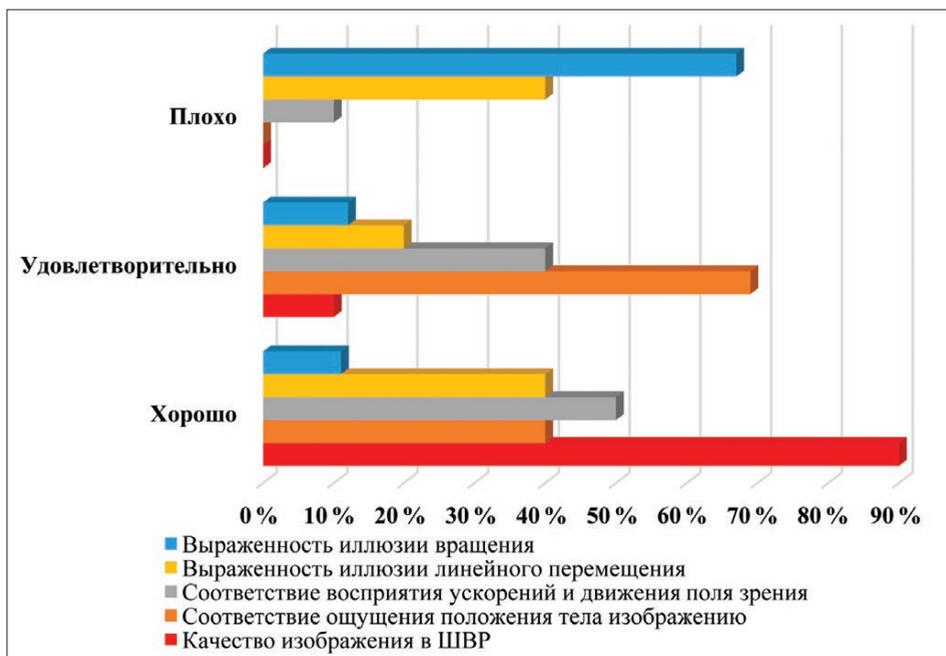


Рис. 15. Оценка эффектов моделирования перемещения на луноходе

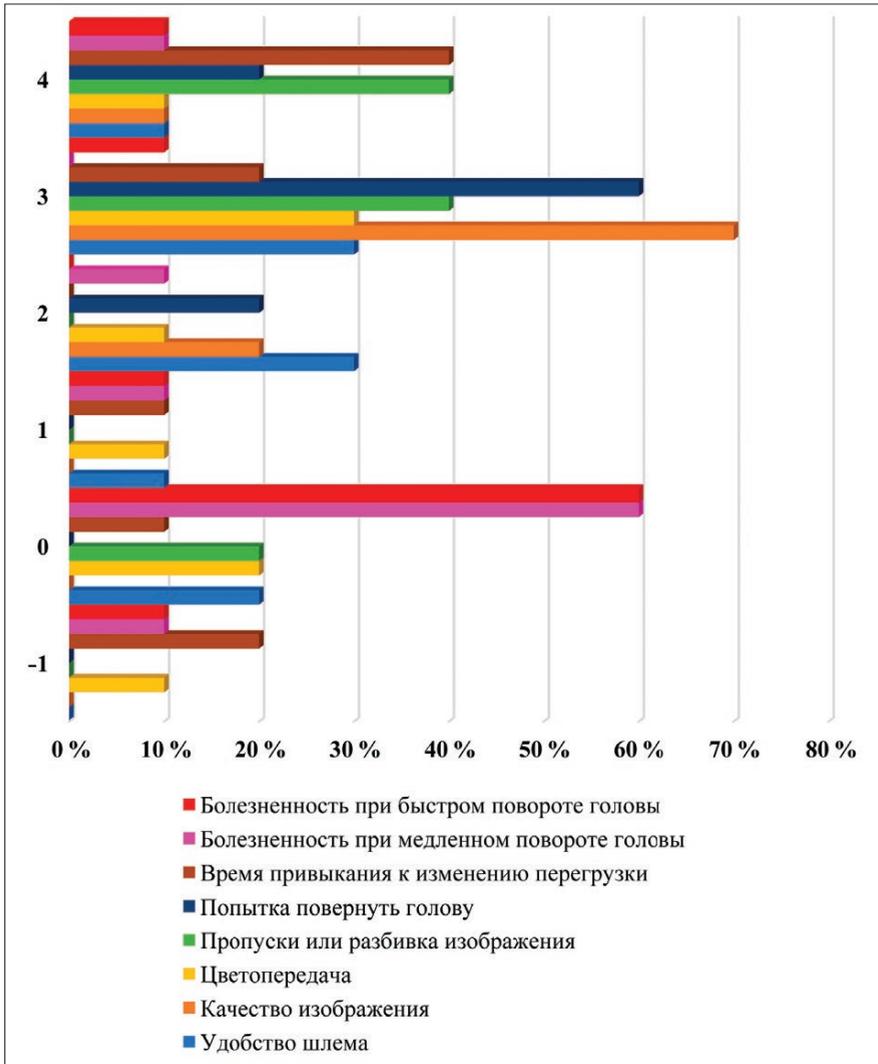


Рис. 16. Оценка эффектов моделирования перемещения на луноходе при сочетании виртуальной реальности с воздействием ускорений на ЦФ-18

При оценке эффектов моделирования перемещения на луноходе, в сочетании виртуальной реальности с воздействием ускорений на ЦФ-18 (рис. 16), испыталы оценивали каждый показатель по субъективным ощущениям по шкале от «Очень отрицательно» до «Очень положительно». Выраженность показателей оценивалась по градациям в диапазоне «-4», «-3», «-2», «-1», «0», «1», «2», «3», «4».

Анализ видеоизображений, физиологических параметров испыталы, стенограмм комментариев испыталы по самоощущениям, анкет и опросников позволил сформулировать следующие положения:

– работа в ШВР без воздействия перегрузки не вызвала выраженного изменения в самочувствии испытуемых;

– изменение общего самочувствия изменялось при воздействии перегрузки и одновременном управлении ВЛ, причем с увеличением воздействия перегрузки явления укачивания усиливались и появлялись дополнительные симптомы;

– в процессе вращения центрифуги при выполнении поворотов головы у части испытуемых фиксировалось состояние дискомфорта, которое ограничивало возможности испытуемых по выполнению маневров ВЛ при движении по лунной поверхности;

– испытуемые, у которых фиксировалось состояние дискомфорта, отмечали сложность управления ВЛ при возникновении признаков вестибулярного расстройства и желание снизить воздействие раздражающего фактора.

В ходе экспериментов у 40 % испытуемых до перегрузки 1,0 ед. не возникало признаков дискомфорта, и они выполняли задачу управления ВЛ без ограничений. У 20 % испытуемых в ходе эксперимента не достигнуты границы начала проявления дискомфорта ввиду того, что перегрузка создавалась до величины 1,4 ед. Следовательно, возможно сформировать группу операторов, которые смогут выполнять управление луноходами, смоделированными на центрифугах, при уровнях перегрузок до 1,0 ед.

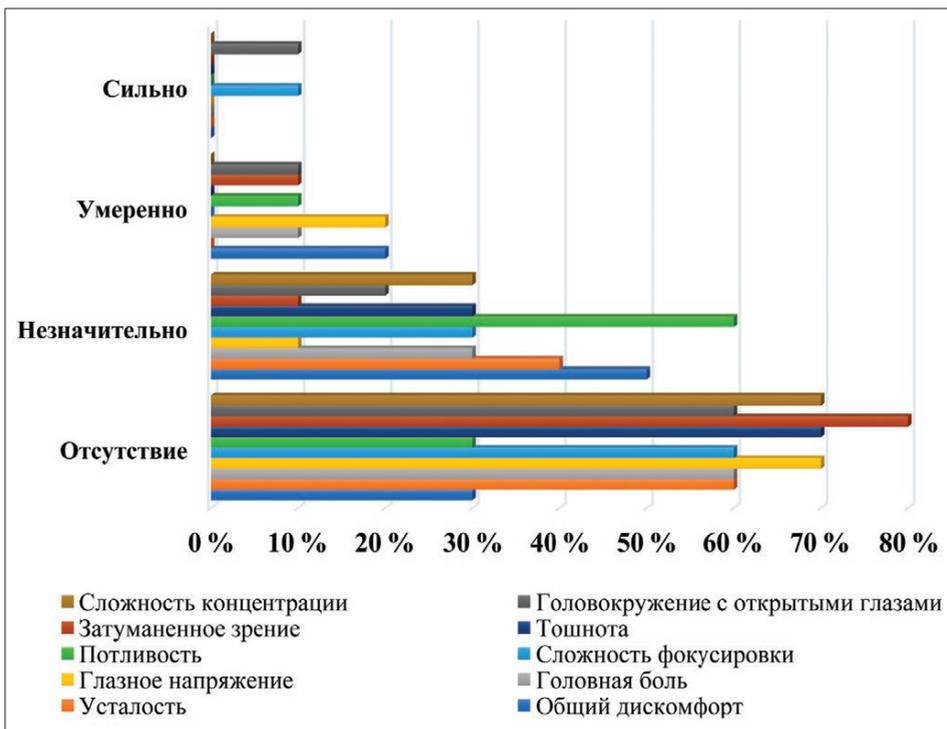


Рис. 17. Оценка симуляторной болезни

Анализ результата по эксперименту с ШВР на ЦФ показывает, что испы­татели в целом положительно оценивают удобство шлема, качество изобра­жения, предъявляемое в шлеме, цветопередачу и четкость изображения, от­сутствие пропусков и сбоев изображения. Была отмечена несинхронизация изображения с ускорениями и перегрузками центрифуги (20 %), а также от­ставание изображения при повороте головы. Отмечено появление диском­форта при медленных и быстрых поворотах головы.

Анализ результатов опроса по оценке эффектов моделирования пере­мещения на луноходе при сочетании виртуальной реальности с воздействи­ем ускорений на ЦФ-18 показывает, что испы­татели в целом положитель­но оценивают качество моделирования изображения в шлеме виртуальной реальности, степень соответствия ощущения положения тела изображению в ШВР, отрицательных оценок по этим параметрам нет. Степень соответст­вия восприятия ускорений и движения поля зрения в ШВР, выраженность иллюзии линейного перемещения, выраженность иллюзии вращения оце­ниваются неоднозначно, есть и положительные и отрицательные оценки.

Анализ результатов опроса по симуляторной болезни показывает, что сильного дискомфорта операторы не испытывали. Отсутствие дискомфорта отметили 20 % испы­тателей, также 20 % испы­тателей отметили умеренный дискомфорт, остальные оценили его как незначительный. В основном дис­комфорт был вызван надавливанием шлема на нос и лоб испы­тателя, а также сползанием шлема и вызванной необходимостью корректировки его положе­ния. Отсутствие усталости отметили 60 % испы­тателей, а 40 % испы­тателей отметили незначительную усталость. 10 %–20 % испы­тателей отмети­ли умеренную головную боль, глазное напряжение, сложность фокусировки, остальные отметили эти факторы как незначительные. По двум критериям – «Отсутствие» и «Незначительно» – оценены вопросы: сложность концентра­ции, тошнота, полнота головы, головокружение с закрытыми глазами, осве­домленность о желудке, отрыжка.

Выводы

Комплект оборудования ВР может быть размещен в кабине центрифуги ЦФ-18.

Экспериментально подтверждена работоспособность средств ВР в ста­тическом и динамическом режимах работы центрифуги.

Экспертным путем определено, что качество моделирования изображе­ния в ШВР, степень соответствия ощущения положения тела изображению, отсутствие существенного дискомфорта при работе в шлеме позволяют его использовать для работы космонавта в кабине центрифуги.

Экспериментальным путем определено, что у испы­тателей при пово­ротах головы на вращающейся центрифуге возникает дискомфорт, огра­ничивающий возможность выполнения задачи управления луноходом. Одна-

ко у 40 % испытуемых до величины перегрузки 1,0 ед. такого дискомфорта не наблюдалось. Следовательно, отмеченный фактор не препятствует возможности создания тренажера на базе центрифуги, так как можно будет отобрать операторов по параметрам вестибулярной устойчивости.

Проведенные исследования показывают, что на базе центрифуги ЦФ-18 возможно создание тренажера по управлению луноходом с использованием средств виртуальной реальности.

Целесообразно продолжение исследований по данной тематике. Дополнительного исследования требует вопрос определения диапазона уровней перегрузок, возникающих при движении лунохода по лунной поверхности при различных кинематических параметрах движения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] К вопросу подготовки космонавтов для работы на поверхности Луны / Иродов Е.Ю., Долгов П.П., Коренной В.С., Крючков Б.И., Ярополов В.И. // Пилотируемые полеты в космос. – 2018. – № 1(26). – С. 71–89.
- [2] Направления исследований и задачи подготовки космонавтов на центрифугах в интересах перспективных космических программ / Долгов П.П., Киршанов В.Н., Гаврик И.Н. // Пилотируемые полеты в космос. Материалы XIII Международной научно-практической конференции. Звездный городок, 2019. – С. 203–204.
- [3] Исследовательский стенд Desdemona. Владимир Бирюков // Форум. 2018. – № 1(21). – С. 26–27.
- [4] О возможности реализации на центрифуге тренажера управления малоподвижным транспортным средством / Бугрий Г.С., Канищев Р.А., Павлов А.В., Пашков И.В., Сухочев П.Ю., Чертополохов В.А. // Пилотируемые полеты в космос. Материалы XIII Международной научно-практической конференции. Звездный городок, 2019. – С. 219–222.
- [5] Булгаков А.В., Белявцев С.Н. Исследование возможности применения средств виртуальной реальности в кабине вращающейся центрифуги ЦФ-18 // Пилотируемые полеты в космос. Материалы XIII Международной научно-практической конференции. Звездный городок, 2019. – С. 225–226.
- [6] Беляев Д.А., Гаврик И.Н. Применение «бортового» компьютера в кабине центрифуги для совершенствования процесса подготовки космонавтов на центрифугах // Пилотируемые полеты в космос. Материалы XIII Международной научно-практической конференции. Звездный городок, 2019. – С. 227–228.
- [7] Белявцев С.Н., Булгаков А.В. Тестирование высокоскоростных цифровых каналов связи кабины ЦФ-18 с системой управления // Пилотируемые полеты в космос. Материалы XIII Международной научно-практической конференции. Звездный городок, 2019. – С. 231–232.
- [8] Булгаков А.В., Гаврик И.Н. Проблемы управления центрифугой при создании стенда с технологией VR // Пилотируемые полеты в космос. Материалы XIII Международной научно-практической конференции. Звездный городок, 2019. – С. 228–229.

REFERENCES

- [1] Cosmonaut training for work on the lunar surface / Irodov E.Yu., Dolgov P.P., Korennoy V.S., Kryuchkov B.I., Yaropolov V.I. // *Scientific Journal Manned Spaceflight*. – 2018. – No 1(26). – pp. 71–89.
- [2] Research directions and issues of cosmonaut training in centrifuges for the benefit of promising space programs / Dolgov P.P., Kirshanov V.N., Gavrik I.N. // *Manned Space flights. Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference*. Star City, 2019. – pp. 203–204.
- [3] Test stand Desdemona. Vladimir Birukov // *Forum*. 2018. – No 1(21). – pp. 26–27.
- [4] About the possibility of simulating a non-mobile vehicle in a centrifuge. Bugriy G.S., Kanishchev R.A., Pavlov A.V., Pashkov I.V., Sukochev P.Yu. // *Manned Space flights. Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference*. Star City, 2019. – pp. 219–222.
- [5] Bulgakov A.V., Belyavtsev S.N. Investigation of the potential use of virtual reality in the cabin of the TsF-18 centrifuge // *Manned Space flights. Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference*. Star City, 2019. – pp. 225–226.
- [6] Belyaev D.A., Gavrik I.N. The use of the on-board computer in the centrifuge cabin to improve the process of training cosmonauts // *Manned Space flights. Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference*. Star City, 2019. – pp. 227–228.
- [7] Belyavtsev S.N., Bulgakov A.V. Testing of high-speed digital communication channels of the TsF-18 cabin with a control system // *Manned Space flights. Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference*. Star City, 2019. – pp. 231–232.
- [8] Bulgakov A.V., Gavrik I.N. Centrifuge control issues when designing a simulator with VR technology // *Manned Space flights. Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference*. Star City, 2019. – pp. 228–229.