

17. Shevtsov M., Gavrilov D., Yudiniceva N., Zemtsova E., Arbenin A., Smirnov V., Voronkina I., Adamova P., Blinova M., Mikhailova N. et al. Protecting the skin-implant interface with transcutaneous silver-coated skin-and-bone-integrated pylon in pig and rabbit dorsum models // *Journal of Biomedical Materials Research. Part B: Applied Biomaterials*. 2021. Vol. 109. № 4. PP. 584-595.
18. Zhang B.G.X. et al. Bioactive coatings for orthopaedic implants – Recent trends in development of implant coatings // *International Journal of Molecular Sciences*. 2014. Vol. 15. № 7. PP. 11878-11921.
19. Albrektsson T., Johansson C. Osteoinduction, osteoconduction and osseointegration // *European Spine Journal*. 2001. Vol. 10. № 2. PP. 96-101.
20. Narra S.P. et al. Additive manufacturing in total joint arthroplasty // *The Orthopedic Clinics of North America*. 2019. Vol. 50. № 1. P. 13.
21. Wodarski P. et al. Wyznaczenie obciażeń w stawie ramiennym z wykorzystaniem przestrzennego matematycznego modelu kończyny górnej // *Modelowanie Inżynierskie*. 2016. Vol. 29. № 60. PP. 74-79.
22. Dumas M., Terriault P., Brailovski V. Modelling and characterization of a porosity graded lattice structure for additively manufactured biomaterials // *Material Design*. 2017. Vol. 121. PP. 383-392.
23. Limmahakhun S., Oloyede A., Sitthiseripratip K., Xiao Y., Yan C. 3D-printed cellular structures for bone biomimetic implants // *Additive Manufacturing*. 2017. Vol. 15. PP. 93-101.
24. Simões J.A., Marques A.T. Design of a composite hip femoral prosthesis // *Materials & Design*. 2005. Vol. 26. № 5. PP. 391-401.

Андрей Владимирович Синегуб,
аспирант,

Высшая школа автоматизации
и робототехники,

Владимир Александрович Суворов,
аспирант,

Высшая школа механики
и процессов управления,

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого»,

Дмитрий Викторович Гаврилов,
аспирант,

кафедра общей хирургии,

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет»,

г. С.-Петербург,

Мохаммад Реза Бахрами,

канд. техн. наук, доцент, научный руководитель,
Университет Иннополис,

г. Иннополис, Республика Татарстан,

e-mail: a.sinegub@yandex.ru

С.Н. Саягин

О создании локальной искусственной силы тяжести для гравитационной гемореабилитации космонавтов в условиях длительной невесомости

Аннотация

Рассмотрена проблема негативного влияния длительной невесомости на организм и, в частности, на кровь космонавта, для решения которой необходимо создание на борту космической станции искусственной силы тяжести. Определены два основных направления: размещение полноразмерной центрифуги короткого радиуса действия на борту космической станции и организация вращения станции или ее модуля. Однако в ближайшей перспективе оба направления являются труднореализуемой задачей. Предложено организовать локальное воздействие искусственной силы тяжести не на весь организм, а лишь на его жидкую ткань – кровь – с целью гравитационной гемореабилитации космонавта в условиях длительной невесомости. Показана возможность применения для этой цели малогабаритного аппарата для прерывистого плазмафереза с многоскоростной центрифугой короткого радиуса, адаптированного к эксплуатации на борту космической станции. При этом гемореабилитация может быть организована в режиме бутафорского, донорского или лечебного плазмафереза, включая внутривенное помповое дозированное вливание лекарственных препаратов.

Введение

В работах [1]-[9] отмечено негативное влияние длительной невесомости на организм космонавта, в частности на его жидкую ткань – кровь [6]-[8]. В связи с этим в нашей стране и за рубежом ведутся работы по организации на борту космической станции (КС) искусственной силы тяжести (ИСТ). В настоящее время определены два основных направления создания ИСТ. Одно из них – размещение полноразмерной центрифуги короткого радиуса действия (ЦКР) на борту КС [1], [3]-[5], другое – организации вращения КС или одного из ее модулей.

По первому направлению в Институте медико-биологических проблем Российской академии наук (ИМБП РАН) накоплен многолетний теоретический и практический опыт, позволивший сформулировать основные требования к бортовой ЦКР и успешно создать ее наземный экспериментальный прототип (рис. 1а) [3]-[5]. При этом в работе [5] отмечено, что действие перегрузок на ЦКР должно быть направлено вдоль продольной оси тела, т. е. от головы к ногам. Очевидно, что ради-

ус ЦКР должен быть не менее роста самого высокого члена экипажа. В связи с этим ИМБП РАН совместно с Ракетно-космической корпорацией «Энергия» планируют разместить ЦКР внутри надувного крупногабаритного трансформируемого модуля 1 в составе новой перспективной Российской служебной орбитальной станции (РОСС) (рис. 1б) [10], [11]. ЦКР будет имитировать ИСТ, близкую к земной, создавая ускорение в направлении «голова-ноги» при скорости вращения 6 об/мин.

В части создания ИСТ вторым способом НАСА в 2011 году предложило проект КС «Наутилус-Х» (NAUTILUS-X) с ЦКР в виде торообразного модуля 2 (рис. 1в), который, вращаясь в диапазоне от 4 до 10 об/мин, должен обеспечить ИСТ в диапазоне 0,08...0,51g при диаметре 9,1 м или 0,11...0,69g при диаметре 12 м [12].

Однако практическая реализация создания ИСТ на борту КС указанными способами в настоящее время и в ближайшей перспективе затруднена в связи с необходимостью решения ряда финансовых и научно-технических проблем. Таким образом, решение проблемы создания ИСТ на борту КС в бли-

жайшей перспективе требует разработки новых подходов и является актуальным направлением в области космической медицинской инженерии. Одним из таких подходов является организация локального воздействия ИСТ не на весь организм космонавта, а лишь на его жидкую ткань – кровь.

Цель работы – разработка новой концепции создания локальной ИСТ на борту КС с целью ее экстракорпорального воздействия на кровь космонавта для проведения гравитационной гемореабилитации (ГГ) в условиях длительной невесомости.

Описание подхода к ГГ космонавтов в условиях длительной невесомости

Суть подхода заключается в том, что в отличие от всех других органов человека кровь, являясь жидкой тканью, может быть выведена из него, подвергнута экстракорпоральному воздействию и введена обратно. Благодаря этому для ГГ космонавта, находящегося в условиях длительной невесомости, не требуется создания громоздких бортовых ЦКР с большим энергопотреблением. Предлагаемый подход может быть реализован при помощи устройства, выполненного на основе широко применяемого в трансфузиологии малогабаритного аппарата для прерывистого плазмафереза (МАПП) с многоскоростной малогабаритной ЦКР и программируемой системой управления, адаптированных к условиям эксплуатации на борту КС. Следует отметить, что к полетам на КС допускаются только практически здоровые космонавты, поэтому каких-либо противопоказаний к проведению плазмафереза нет. На рис. 2а показан пример проведения процедуры донорского плазмафереза на МАПП, модели PCS2 фирмы «Гемонетикс Корпорейшн» (США).

Порядок подготовки и начало процедуры включают в себя: выбор протокола, установку комплекта расходных материалов, ввод информации по донору и модификацию параметров процедуры, выполнение одного прокалывания вены и иницирование процедуры. Длительность процедуры составляет 40...45 мин. Скорость вращения ЦКР составляет от 3 000 до 7 000 об/мин в зависимости от выбранного протокола. Сенсорная интерактивная панель управления позволяет оператору иметь обратную связь и получать онлайн-помощь. На

рис. 2б представлена структурная схема организации ГГ космонавта с одновременными детоксикацией организма и обеззараживанием крови внешними воздействующими факторами (ВВФ), например, путем ультрафиолетового облучения крови (УФОК) и др. [7], [8].

Устройство для реализации данного подхода включает в себя систему создания ИСТ в виде применяемого в трансфузиологии МАПП с многоскоростной ЦКР 1 и микропроцессорной системой управления [7], [8], адаптированного к эксплуатации на борту КС. МАПП подсоединяют к вене космонавта через кровопроводящую магистраль (КТ) 2 экстракорпорального контура. КТ 2 связана с одной стороны через фильтр 3, клапан 4 и насос крови (НК) 5 с ЦКР 1, а с другой – через насос антикоагулянта (НАК) 6 с емкостью 7, заполненной антикоагулянт (АК). При этом между НАК 6 и КТ 2, НК 5 и клапаном 4, фильтром 3 и веной космонавта установлены соответственно воздушные детекторы (ВД) 8, 9 и 10. Между клапаном 4 и фильтром 3 установлен монитор давления (МД) 11 КТ 2. ЦКР 1 через магистраль 12 соединена с емкостью 13 для заготавливаемых (удаляемых) компонентов крови, например плазмы. Между ЦКР 1 и емкостью 13 для плазмы установлены сенсор 14 магистрали 12 и клапан 15. К участку магистрали 12 между сенсором 14 и клапаном 15 через клапан 16 подсоединена емкость 17 с физраствором (NaCl), а между сенсором 14 и клапаном 16 установлен МД 18 магистрали 12. Между емкостями 13 и 17 и клапанами 15 и 16 установлены соответственно насосы заготавливаемых (удаляемых) компонентов крови 19 и физраствора 20, а между воздушным детектором 8 и КТ 2 установлен клапан 21.

В работе [8] показано расширение функциональных возможностей процесса центрифугирования путем изменения по модулю и направлению вектора силы инерции, действующей на клетки крови в процессе центрифугирования. Это достигается за счет организации переносного вращательного движения корпуса МАПП с вращающейся ЦКР 1 с порцией крови и возникновения при этом нормальной и тангенциальной составляющих переносного ускорения и ускорения Кориолиса. Ниже приведены примеры возникновения указанных дополнительных ускорений, действующих на клетки порции крови в ЦКР 1 для случаев поворота корпуса МАПП относительно оси, ор-

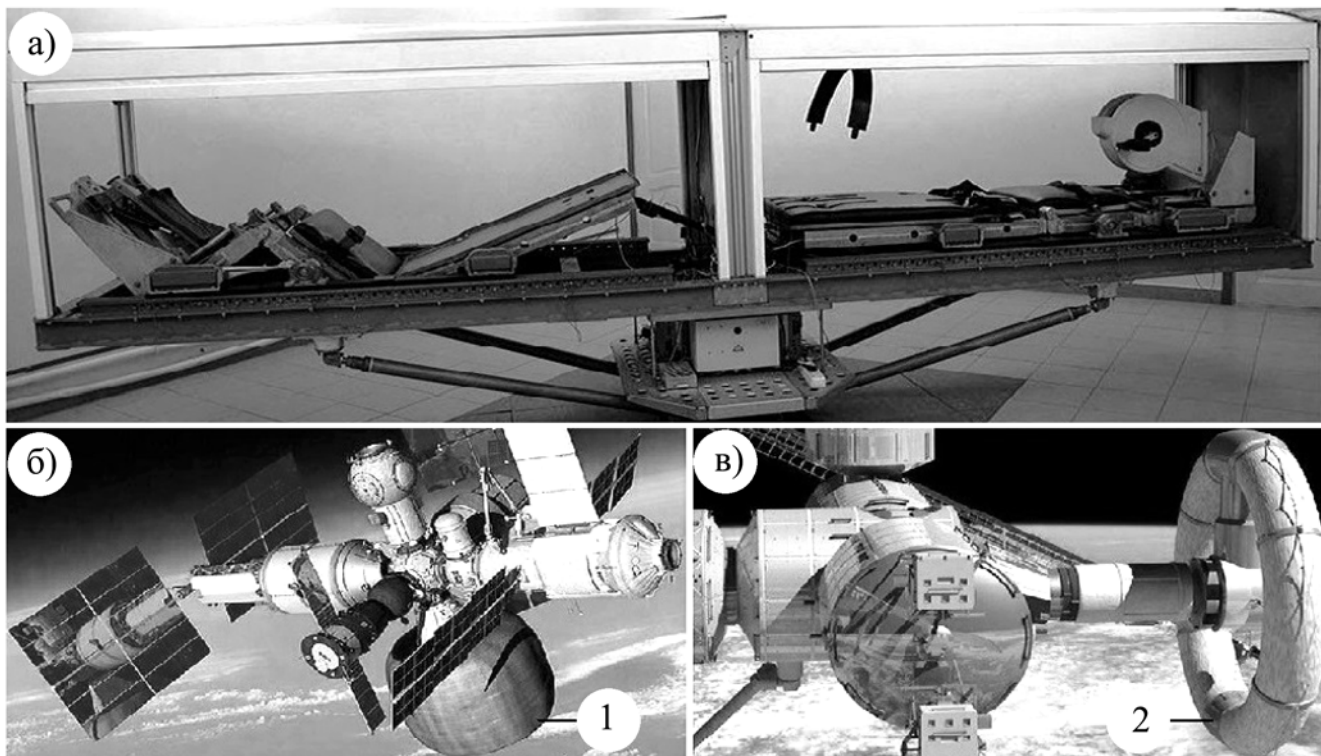


Рис. 1. Наземный прототип бортовой ЦКР для РОСС (а); трансформируемый модуль 1 с ЦКР в составе РОСС (б); проект КС «Наутилус-Х» с ЦКР в виде торообразного модуля 2 (в) (пояснения – в тексте)

тогональной (рис. 3а) или параллельной (рис. 3б) оси вращения ЦКР 1.

В случае поворота корпуса МАПП в процессе центрифугирования, например по часовой стрелке вокруг оси, ортогональной оси вращения ЦКР 1, на точки *A, B, C, D* порции крови в ЦКР 1, расположенные на концах ортогональных диаметров их общей траектории, действуют ускорения, векторы которых показаны на рис. 3а.

Здесь $\vec{\omega}_e, \vec{\omega}_r$ – векторы переносной и относительной угловых скоростей соответственно; $\vec{V}_{Ar} = \vec{V}_{Br} = \vec{V}_{Cr} = \vec{V}_{Dr}$ – векторы линейных относительных скоростей точек *A, B, C, D*; $\vec{a}_{Ar}^n = \vec{a}_{Br}^n = \vec{a}_{Cr}^n = \vec{a}_{Dr}^n$ – относительные нормальные ускорения, приложенные к точкам *A, B, C, D*; $\vec{a}_{Be}^n = \vec{a}_{De}^n$ – переносные нормальные ускорения, приложенные к точкам *B, D*; $\vec{a}_{Be}^{\tau} = \vec{a}_{De}^{\tau}$ –

переносные тангенциальные ускорения, приложенные к точкам *B, D*; \vec{a}_K – ускорение Кориолиса.

Для определения модулей указанных скоростей и ускорений используют следующие известные кинематические формулы теоретической механики [13]:

$$V_r = \omega_r R,$$

где $\omega_r = \text{const}$; *R* – кратчайшее расстояние от оси вращения ЦКР 1 до соответствующей точки;

$$a_r^n = \omega_r^2 R; a_r^{\tau} = \dot{\omega}_r R = 0,$$

так как $\omega_r = \text{const}$;

$$a_e^n = \omega_e^2 R; a_e^{\tau} = \dot{\omega}_e R.$$

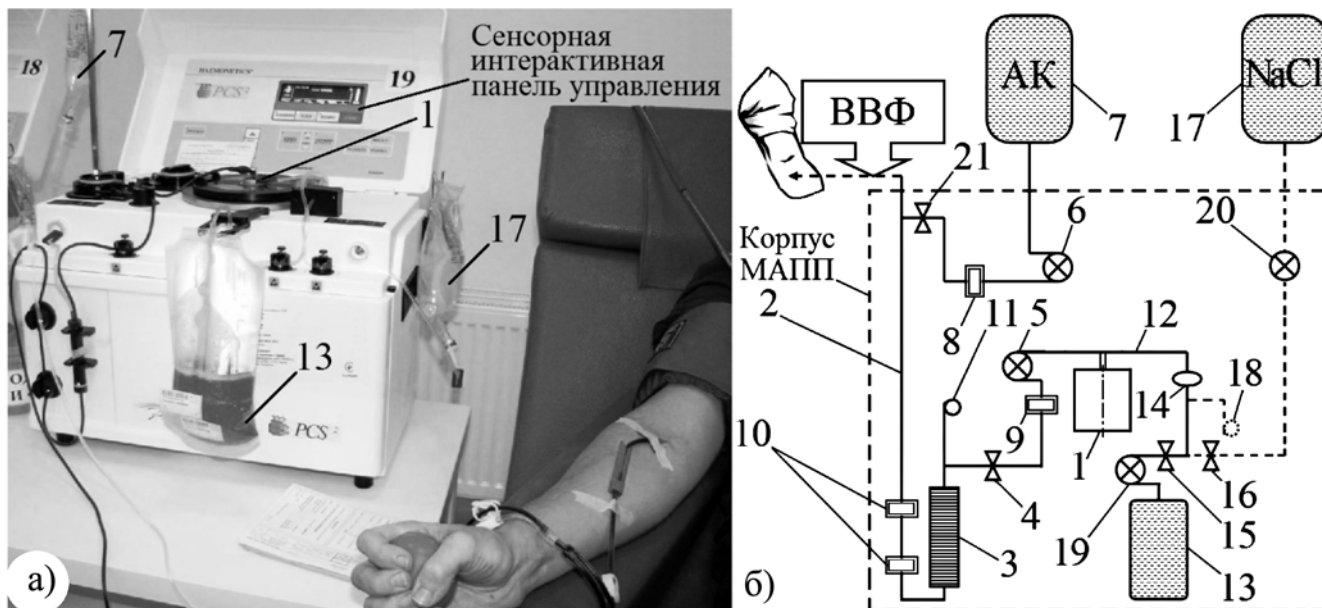


Рис. 2. Процедура донорского плазмафереза на МАПП (а) и структурная схема ГГ космонавта на борту КС (б) (пояснения – в тексте)

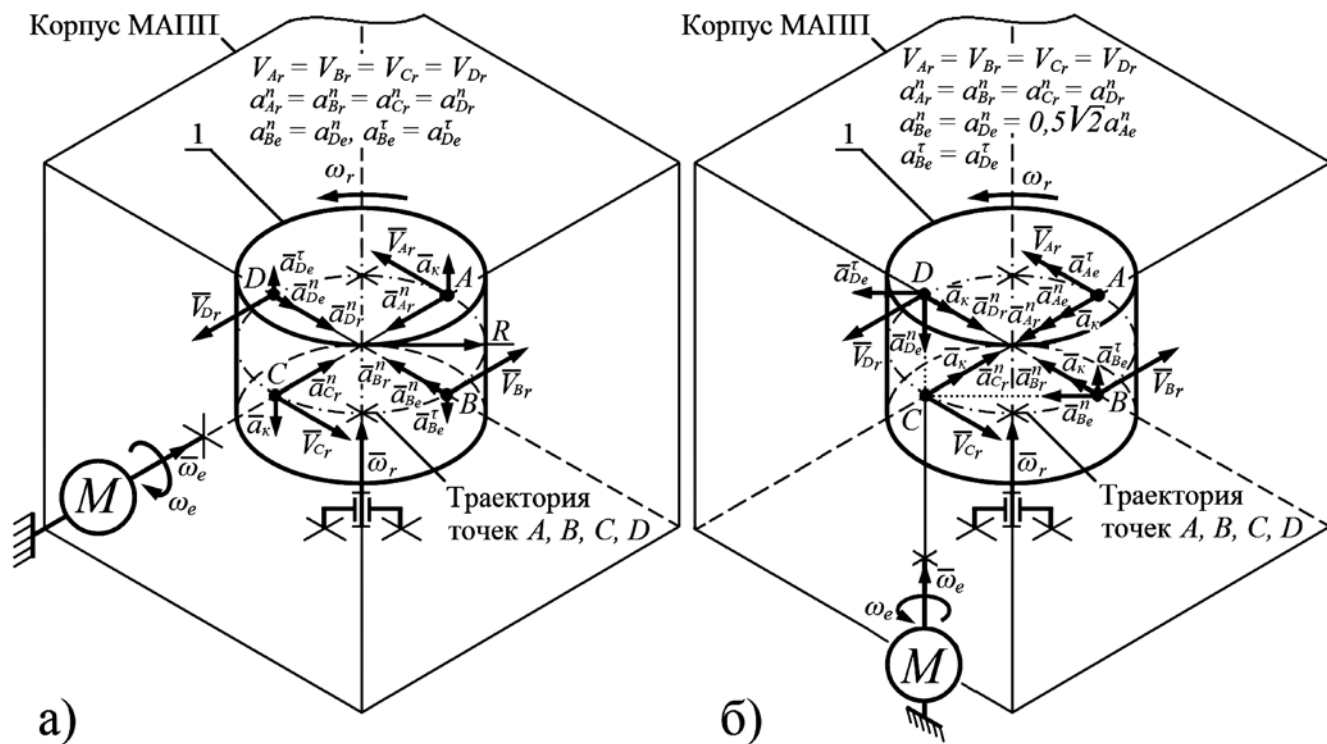


Рис. 3. Направления действия нормальной и тангенциальной составляющих переносного ускорения и ускорения Кориолиса при повороте корпуса МАПП относительно оси, ортогональной (а) или параллельной (б) оси вращения ЦКР 1 (пояснения – в тексте)

При этом ускорения

$$\bar{a}_{Ae}^n = \bar{a}_{Ce}^n = \bar{a}_{Ae}^{\tau} = \bar{a}_{Ce}^{\tau} = 0,$$

так как точки *A* и *B* лежат на оси поворота корпуса МАПП.

$$\bar{a}_K = 2\omega_e V_r \sin\left(\hat{\omega}_e, \hat{V}_r\right).$$

Как видно из рис. 3а, ускорение $a_{Bk} = a_{Dk} = 0$, так как

$$\sin(\hat{\omega}_e, \hat{V}_{Br}) = \sin(\hat{\omega}_e, \hat{V}_{Dr}) = 0.$$

При этом полное ускорение, действующее на каждую из точек порции крови в ЦКР 1, определяется из векторного кинематического уравнения Кориолиса ($\bar{a} = \bar{a}_e^n + \bar{a}_e^{\tau} + \bar{a}_r^n + \bar{a}_r^{\tau} + \bar{a}_K$) путем его проецирования на оси *x*, *y*, *z*:

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}.$$

Аналогично определяются ускорения в случае поворота корпуса МАПП относительно оси, параллельной оси вращения ЦКР 1 (рис. 3б).

В результате поворотов корпуса МАПП вокруг оси, ортогональной или параллельной оси вращения ЦКР 1, вектор полного ускорения и, следовательно, вектор результирующей силы инерции, действующей на каждую из точек (клеток) порции крови, будет изменяться по модулю и направлению.

ГГ космонавтов на борту КС реализуется в три этапа.

На первом, подготовительном, этапе осуществляются сборка и подключение системы для сбора крови через КТ 2 к вене космонавта.

На втором этапе выбирается программа для микропроцессорной системы управления МАПП для проведения ГГ космонавта и производится его запуск и работа по установленной программе, включая остановку после ее завершения. Следует отметить, что применение данного приема при проведении лечебного или донорского плазмафереза позволит улучшить качество возвращаемых (лечебный плазмаферез) или заготавливаемых (донорский плазмаферез) компонентов крови.

На третьем этапе осуществляются отключение и утилизация системы для сбора крови.

Основные режимы процедуры гравитационной гемореабилитации космонавта

Процедуру ГГ космонавта на борту КС, заключающуюся в организации периодического экстракорпорального воздействия на его кровь ИСТ, проводят по одному из следующих режимов или их комбинаций.

1-й режим: ГГ, при которой кровь космонавта стерильно из его вены выводят наружу из организма, смешивают с АК, центрифугируют и возвращают в то же кровяное русло. Данная процедура может быть отнесена к разновидности бутафорского плазмафереза, обеспечивающего дополнительный положительный терапевтический эффект [14].

2-й режим: ГГ с одновременным проведением прерывистого аппаратного донорского плазмафереза, при которой кровь космонавта стерильно из его вены выводят наружу из организма, смешивают с АК, центрифугируют до разделения цельной крови на компоненты, выделяют необходимый компонент крови и возвращают в то же кровяное русло все остальные компоненты, смешанные с физраствором, восполняющим недостающий объем циркулирующей плазмы в организме космонавта.

3-й режим: ГГ с одновременным проведением прерывистого аппаратного лечебного плазмафереза, при которой кровь космонавта стерильно из его вены выводят наружу из организма, подвергают (при необходимости) ВВФ, например УФОК и др., смешивают с АК, центрифугируют до разделения цельной крови на компоненты, избирательно выделяют и удаляют патологические компоненты крови (клетки крови или плазменные субстраты, имеющие патологическое значение в развитии заболевания) и возвращают в то же кровяное русло все остальные компоненты, смешанные с физраствором, вос-

полняющим недостающий объем циркулирующей плазмы в организме космонавта.

Работа МАПП в каждом из приведенных выше режимов осуществляется следующим образом.

1-й режим: ГГ космонавта. Здесь после венепункции включается НК 5, при помощи которого кровь космонавта по КТ 2 через воздушные детекторы 10 (для повышения безопасности не менее двух), фильтр 3 и ВД 9 поступает в колокол-ротатор (на рис. 1б условно не показан) ЦКР 1 до его заполнения до требуемого объема, после чего НК 5 отключается. При этом при помощи НАК 6 АК смешивается с кровью, поступая из емкости 7 через ВД 8. Клапаны 21 и 4 находятся в открытом, а клапаны 15 и 16 – в закрытом положениях. Затем клапан 4 закрывается и включается ЦКР 1. После организации воздействия ИСТ на взятую у космонавта порцию крови по заданным режимам ЦКР 1 отключается, а колокол-ротатор с отцентрифугированной порцией крови встряхивают для смешивания ее компонентов. После этого клапан 21 закрывают, а клапан 4 открывают и включают НК 5, при помощи которого отцентрифугированная порция крови возвращается космонавту через то же кровяное русло. Затем одноразовые расходные материалы удаляют и утилизируют. Процедура окончена. В процессе проведения процедуры ВД 8, 9 и 10 показывают наличие воздуха в магистралях. В случае его наличия система создания ИСТ в виде применяемого в трансфузиологии МАПП отключается. Фильтр 3 служит для очистки проходящей через него крови от сгустков, включений и примесей. МД 11 показывает достаточность уровня давления крови в магистрали. Если уровень ниже нормы, то космонавт должен осуществлять сжимание и разжимание кисти руки, из которой осуществляется забор крови, в кулак.

2-й режим: ГГ космонавта с одновременным проведением прерывистого аппаратного донорского плазмафереза. Здесь после венепункции включается НК 5, при помощи которого кровь космонавта по КТ 2 через ВД 10 (для повышения безопасности не менее двух), фильтр 3 и ВД 9 поступает в колокол-ротатор (на рис. 2 условно не показан) ЦКР 1 до его заполнения до требуемого объема, после чего НК 5 отключается. При этом при помощи НАК 6 антикоагулянт смешивается с кровью, поступая из емкости 7 через ВД 8. Клапаны 21 и 4 находятся в открытом, а клапаны 15 и 16 – в закрытом положениях. Затем клапан 4 закрывается и включается ЦКР 1. После центрифугирования взятой у космонавта цельной крови до ее разделения на компоненты ЦКР 1 отключается и выделенный необходимый для заготовки компонент, например плазма, поступает при помощи насоса 19 в емкость 13. При этом клапан 15 открыт. После заполнения плазмой емкости 13 насос 19 выключается. Клапаны 15 и 21 принимают закрытое, а клапаны 4 и 16 – открытое положения. После этого включают НК 5 и насос физраствора 20, при помощи которых отцентрифугированные остальные компоненты крови, смешанные с физраствором, восполняющим недостающий объем циркулирующей плазмы в организме космонавта, возвращаются космонавту через то же кровяное русло. При необходимости перед возвратом компонентов крови может быть повторено их центрифугирование по индивидуальным режимам. При этом клапаны 4, 15 и 16 закрыты, а насосы 5, 19 и 20 отключены. Затем одноразовые расходные материалы удаляют и утилизируют. Процедура окончена. В процессе проведения процедуры сенсор 14 показывает уровень чистоты заготавливаемой плазмы, т. е. отсутствие в ней эритроцитарной массы. В случае избытка эритроцитов система создания ИСТ в виде МАПП отключается. МД 18 показывает уровень давления плазмы в магистрали 12.

3-й режим: ГГ космонавта с одновременным проведением прерывистого аппаратного лечебного плазмафереза. Процедура проводится аналогично процедуре режима 2 с той лишь разницей, что при необходимости взятую у космонавта кровь перед центрифугированием подвергают в КТ 2 ВВФ, например УФОК, а выделенные после центрифугирования патологические компоненты крови, например плазменные субстраты, имеющие патологическое значение в развитии заболевания, удаляют и утилизируют.

Следует отметить, что в орбитальном полете, как и в наземных условиях, космонавты подвержены соматическим заболеваниям, заболеваниям кожи, миозитам и др. [15]. В то же время прерывистый лечебный плазмаферез при помощи МАПП эффективно применяется в современных условиях при многих заболеваниях в хирургии, пульмонологии, кардиологии, нефрологии, дерматологии, реаниматологии и интенсивной терапии критических состояний. При этом следует отметить, что абсолютных противопоказаний к лечебному плазмаферезу нет [14], [16]. Таким образом, МАПП может быть эффективно применен не только для ГГ космонавтов в условиях длительной невесомости, но и для профилактики и лечения ряда заболеваний, а также проведения интенсивной терапии на борту КС.

Как было отмечено выше, предлагаемый новый подход к организации ГГ космонавтов в условиях длительной невесомости может быть реализован на основе известных в настоящее время МАПП, применяемых в трансфузиологии для проведения донорских и лечебных процедур, после их адаптации в части напряжения питания и программного обеспечения к эксплуатации на борту КС. Такой подход позволит не только снизить негативное влияние длительной невесомости на клетки крови космонавтов, например при осуществлении пилотируемой экспедиции на Марс, но и организовать профилактическую, лечебную и, при необходимости, неотложную помощь для широкого спектра заболеваний, которые могут возникнуть у космонавтов на борту КС, а также осуществлять индивидуальную заготовку компонентов крови космонавтов для их хранения в условиях длительного пребывания в космосе.

Заключение

Представлен подход к организации ГГ космонавтов в условиях длительной невесомости, который может быть реализован в ближайшей перспективе на базе серийно выпускаемых МАПП.

Показана возможность расширения функциональных возможностей процесса центрифугирования порции крови за счет поворотов корпуса МАПП относительно оси, ортогональной или параллельной оси вращения ЦКР.

ГГ космонавта при помощи МАПП может проводиться на борту КС в режиме бутафорского, донорского или лечебного плазмафереза, включая внутривенное помповое дозированное вливание лекарственных препаратов.

МАПП позволяет управлять процессом проведения ГГ космонавта как самостоятельно, так и дистанционно в режиме телемедицины с одновременным мониторингом состояния космонавта.

В перспективе МАПП может использоваться для ГГ космонавтов и проведения лечебного плазмафереза в составе медицинских робототехнических комплексов и средств, предназначенных для обслуживания участников длительных лунных и марсианских экспедиций.

Список литературы:

1. Виль-Вильямс И.Ф., Котовская А.Р. Влияние на организм человека искусственной гравитации, создаваемой с помощью центрифуги. Положительные и отрицательные эффекты // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2003. Т. 37. № 2. С. 11-16.
2. Котовская А.Р. Признаки негативных эффектов кумуляции у человека и животных при действии перегрузок разного направления применительно к практике авиационных и космических полетов // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2015. Т. 49. № 6. С. 14-18.
3. Котовская А.Р., Виль-Вильямс И.Ф. Центрифуга короткого радиуса: история и перспективы использования в практике космонавтики и здравоохранения // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2004. Т. 38. № 5. С. 3-11.

4. Котовская А.Р. Переносимость человеком перегрузок в космических полетах и искусственная гравитация // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2017. Т. 51. № 5. С. 5-21.
5. Орлов О.И., Колотева М.И. Центрифуга короткого радиуса как новое средство профилактики неблагоприятных эффектов невесомости и перспективные планы по разработке проблемы искусственной силы тяжести применительно к межпланетным полетам // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2017. Т. 51. № 7. С. 11-18.
6. Larina I.M., Percy A.J., Yang J. et al. Protein expression changes caused by spaceflight as measured for 18 Russian cosmonauts // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. № 1. PP. 1-7.
7. Саяпин С.Н., Саяпина А.С., Саяпина Е.В. Способ гравитационной реабилитации космонавтов в условиях длительной невесомости и устройство для его осуществления / Патент РФ № 2306151. 2007. Патентообладатель: ФГБУН ИМАШ РАН.
8. Саяпин С.Н., Саяпина Е.В. Способ гравитационной реабилитации космонавтов в условиях невесомости и устройство для его осуществления / Патент РФ № 2757577. 2021. Патентообладатель: ФГБУН ИМАШ РАН.
9. Doroshin A., Jillings S., Jeurissen B. et al. Brain Connectometry Changes in Space Travelers After Long-Duration Spaceflight // *Frontiers in Neural Circuits*. 2022. Vol. 16. Art. 815838. PP. 1-10.
10. Микрин Е.А. Перспективы развития отечественной пилотируемой космонавтики (к 110-летию со дня рождения С.П. Королева) // *Космическая техника и технологии*. 2017. № 1 (16). С. 5-11.
11. Извеков И. Заглядывая вперед // *Русский: главный журнал о космосе*. 2022. № 2 (36). С. 52-55.
12. Seedhouse E. Bigelow Aerospace. – Springer International Publishing: Imprint: Springer, 2015. PP. 90-93.
13. Дронг В.И., Дубинин В.В., Ильин М.М. и др. Курс теоретической механики. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 580 с.
14. Калинин И.Н. и др. Клиническое применение экстракорпоральных методов лечения. – М.: ЗАО «Трекпор Технолджи», 2006. 168 с.
15. Максимов Д.А., Бояринцев В.В., Орлов О.И. и др. Актуальность расширения объема первой помощи при жизнеугрожающих состояниях в системе медицинского обеспечения пилотируемой космической деятельности (обзор литературы) // *Кремлевская медицина. Клинический вестник*. 2019. № 3. С. 44-49.
16. Gniadek T. Production of Components by Apheresis // *Transfusion Medicine* (ed. J. McCullough). – John Wiley & Sons, 2021. PP. 90-110.

Сергей Николаевич Саяпин,
д-р техн. наук, гл. научный сотрудник,
отдел «Вибрационная биомеханика»,
ФГБУН «Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова» РАН,
г. Москва,
e-mail: S.Sayapin@rambler.ru