

УДК 681.51.012: 531.5

## ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ «ЧЕЛОВЕК – ЦЕНТРИФУГА» НАЗЕМНОГО И КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННОГО ПОДХОДА

© 2013 Г. П. Аншаков<sup>2</sup>, В. А. Акулов<sup>1</sup>, В. Л. Балакин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

<sup>2</sup>Государственный научно-производственный ракетно-космический  
центр «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

Приведены результаты верификации предложенного критерия оценки адекватности управляемой искусственной силы тяжести (ИСТ) и естественной силы тяжести (ЕСТ). Показана правомерность использования критерия при решении задач сходства / различий ИСТ и ЕСТ.

*Мехатронная система «человек – центрифуга», модель, критерий, верификация, теоретико-множественный подход.*

Статья представляет расширенное изложение доклада, сделанного в рамках Международного научно-технического форума, посвящённого 100-летию ОАО «Кузнецов» и 70-летию СГАУ [1].

**Введение.** Среди многочисленных технических средств медицинского назначения особое положение занимают центрифуги короткого радиуса действия (ЦКР). Они предназначены для создания управляемой искусственной силы тяжести (ИСТ) в форме локального поля центробежных ускорений, в которое помещается человек (испытатель, космонавт, пилот, больной с разнообразными нозологическими формами). Как результат формируется сложная мехатронная

система класса «человек – ЦКР». Подобные системы в одно- и многоместном исполнении получили распространение в США, ФРГ, Франции, России и Японии. На рис. 1 в качестве типового примера представлена фотография одноместной ЦКР, установленной в Самарском государственном медицинском университете (СамГМУ), на которой выполняются сеансы гравитационной терапии (ГТ) [2]. Под ГТ понимаются физиотерапевтические процедуры, представляющие собой разновидность восстановительной медицины и заключающиеся в воздействии на организм человека управляемым центробежным ускорением, создаваемым ЦКР в направлении «голова – ноги».

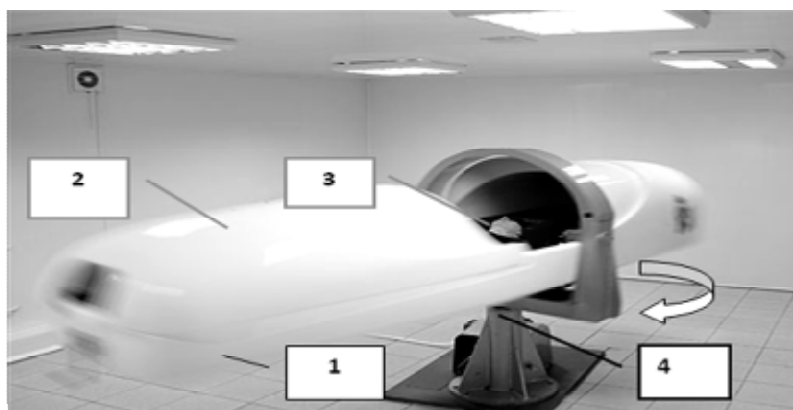


Рис. 1. ЦКР для проведения сеансов ГТ:

1 - ротор – горизонтальный стол, 2 - кабина пациента, 3 - пациент в позе «лёжа», 4 - ось вращения

Что касается задач целеполагания, то они отличаются значительным разнообразием, которое обусловлено многочисленными требованиями со стороны космической медицины (КМ) и ГТ. В их числе активное устранение фактора невесомости, научные исследования по проблемам гравитации с целью выработки медицинских технологий, ориентированных на обеспечение перспективных программ освоения Космоса, включая межпланетные экспедиции (Луна, Марс), лечение широкого спектра заболеваний периферической системы кровообращения (травмы, переломы, ишемии) [2 - 4].

**Постановка задачи.** Как следует из изложенного, ЦКР является физической моделью естественной силы тяжести, причём во всём её многообразии, включая гравитацию Земли, Луны и Марса. Указанные обстоятельства определяют исключительную актуальность задач по оценке адекватности ИСТ и ЕСТ, которая, в свою очередь, включает в себя три позиции: построение (выбор) критериев адекватности, формулировку правил их оценивания и верификацию на предмет достоверности [5]. Некоторые из аспектов, относящихся к оценке адекватности и верификации, изложены ниже.

Необходимо отметить, что в медицинских приложениях получил распространение «промышленный» подход к оценке адекватности [2, 3]. Его основу составляют эксперименты с вариациями величины перегрузки (фактора разделения), которая определяется формулой

$$+G_z = \omega^2 z / g, \quad (1)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора ЦКР,  $z$  – текущий радиус вращения,  $g$  – ускорение свободного падения у поверхности Земли (напряжённость поля ЕСТ).

Как показывает накопленный опыт, такой подход недостаточен в медицинских приложениях по целому ряду причин. Во-первых, в отличие от векторного поля напряжённостей планет (ЕСТ), поле центростремительных ускорений, создаваемых ЦКР, неоднородно (как это следует из (1) при  $0 \leq z \leq R$ , где  $R$  – внешний радиус ЦКР). Во-вторых, выражение (1) соответствует только модели ЦКР, то есть лишь части системы «человек – ЦКР». В-третьих, поскольку рост человека соизмерим с  $R$ , то следует учитывать распределённость внутрисистемных параметров по координате  $z$ . В-четвёртых, в случае применения выражения (1) возникают неопределённости как с величиной перегрузки ( $+G_z$ ), так и с местом её приложения (координата  $z$ ).

Как следствие указанных факторов, формула (1) не обеспечивает выработку управляющей информации, необходимой для решения задач целеполагания, связанных, прежде всего, с перспективами использования КМ и ГТ. Наглядным примером служит задача нахождения режима вращения, моделирующего гравитацию Луны в наземных и космических условиях.

В монографии [6] предложен критерий адекватности ИСТ и ЕСТ вида

$$d = \left( \frac{\omega^2 h^3 - R_1^2 (3h - 2R_1)}{3g (h - R_1)^2} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $h$  – рост пациента,  $R_1$  – расстояние от оси вращения до сердца.

Согласно (2), оценка адекватности ИСТ и ЕСТ состоит в нахождении распределения давления в артериальном русле человека, обусловленного центробежной силой (семейство парабол  $\Delta p(\delta)$ , рис. 2), наименее отличающегося от эталонного распределения, каковым является гидростатическое давление (прямая  $\Delta p_{\text{г. стат. Земля}}$ ).

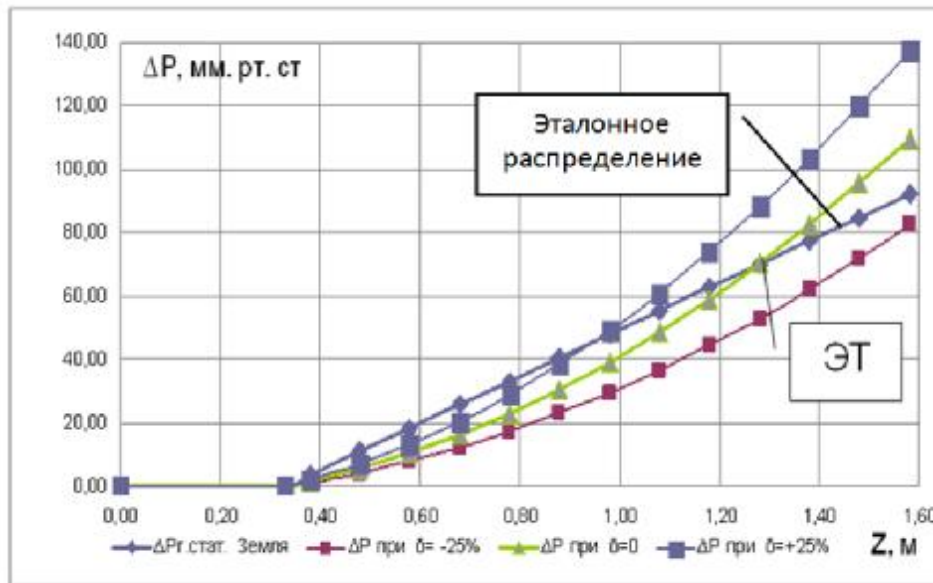


Рис. 2. Геометрический смысл задачи нахождения наилучшего приближения ИСТ (ЦКР) и ЕСТ (Земля)

Отметим следующее. Во-первых, критерий (2) устраняет указанные выше неопределённости, возникающие в случае применения формулы (1). Во-вторых, величина  $\delta$  определяет три режима воздействия. Если  $\delta = 0$ , то имеет место минимум отличий из числа возможных (адекватность). При  $\delta < 0$  имеет место гипогравитация, а при  $\delta > 0$  – гипергравитация. В-третьих, множество распределений (три из них в качестве иллюстрации показаны на рис. 2) представляет собой пространство состояний системы «человек – ЦКР». Как следствие, задача выбора наилучшего решения, обусловленного задачами целеполагания, сводится к процедуре, известной как парное сравнение характеристик в пространстве состояний [5]. В-четвёртых, критерий (2) обеспечивает выработку информации, необходимой для индивидуальной настройки системы управления ЦКР, исходя из выбранной задачи целеполагания (обеспечения требуемого состояния из числа возможных). В-пятых, основу предлагаемой критериальной оценки адекватности составляет физическая природа систем «человек – ЦКР».

Учитывая значимость  $\delta$  – критерия, оценка его достоверности является от-

дельной задачей, которая позиционируется как верификация.

**Методологические основы исследований.** При разработке методологии верификации предлагаемого критерия были учтены следующие требования:

- доступность методов и результатов научных исследований врачам КМ и ГТ, а также студентам медицинских вузов, поскольку они являются активными пользователями ЦКР;

- альтернативные принципы построения доказательной базы;

- обеспечение количественной оценки сходства и различий множества состояний систем «человек – ЦКР» в широком диапазоне управления состояниями, включая гипо- и гипергравитацию.

Указанным требованиям отвечает теоретико-множественный подход, который позволяет оценить объект исследований, в данном случае  $\delta$  – критерий, с различных позиций с получением как качественных, так и количественных показателей.

Исследования включали в себя следующие этапы:

1. Анализ мер по обеспечению достоверности  $\delta$  – критерия при его разработке.

2. Непараметрический анализ распределений гидростатического и инерционного давления на основе критерия  $c^2$ .

3. Непараметрический анализ распределений на основе критерия знаков.

4. Регрессионный анализ распределений давления.

5. Компьютерное моделирование типовых сеансов вращения человека на ЦКР, выполненных в КМ и ГТ.

6. Постановка и выполнение проблемно-ориентированных медико-технических экспериментов на ЦКР.

В статье излагаются результаты, полученные при выполнении этапов 2 и 4.

**Непараметрический анализ на основе критерия  $c^2$ .** Как известно, критерий  $c^2$  является мерой различий двух процессов, причём процессы могут быть как стохастическими, так и детерминированными. В данной серии исследовались детерминированные процессы, представленные в виде точечных множеств. Решение задачи включало в себя две процедуры: а) определение зависимости  $c^2$  от  $\delta$  при постоянстве эталонного и вариации модельных процессов (три из них показаны на рис. 2); б) нахождение минимума  $c^2$ , который и определяет состояние (распределение), обладающее минимальными отличиями от эталонного, причём по формальным признакам. Остаётся доказать, что минимуму  $c^2$  соответствует нулевая величина  $\delta$  – критерия.

В результате адаптации критерия  $c^2$  к специфике решаемой задачи получена формула

$$c^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(\Delta P_{i,г.статЗемля} - \Delta P_i(d_j))^2}{\Delta P_{i,г.статЗемля}}, \quad (3)$$

где  $i = \overline{1, N}$  – количество точек при дискретном задании распределения давлений, зависящее от шага дискретизации по продольной координате ( $\Delta z$ );  $j = \overline{1, m}$  – число анализируемых состояний систем, отличающихся величиной  $\delta$ .

При расчётах по формуле (3) были приняты следующие исходные данные: диапазон управления  $\delta \in [-25\%, +25\%]$ ; число состояний системы  $m = 9$ ; два уровня дискретизации по продольной координате (радиусу), отличающиеся по величине в два раза:  $\Delta z = 0,05$  м ( $N = 28$ ),  $\Delta z = 0,1$  м ( $N = 14$ ); моделируемая планета как вариант ЕСТ – Земля.

Результаты выполненных расчётов представлены на рис. 3 и в табл. 1. В целях обобщения приняты следующие обозначения:  $\bar{c}^2 = c^2 / c_{\min}^2$ ,  $\bar{n} = n / n_{\text{ном}}$ , где  $n$  – частота вращения ротора ЦКР [об/мин],  $n_{\text{ном}}$  – номинальная частота вращения, соответствующая режиму адекватности ( $\delta = 0$ ).

В результате исследований установлены следующие закономерности:

1. Зависимость  $\bar{c}^2$  от  $\delta$  является унимодальной с явно выраженным минимумом, причём  $\text{Min} \{ \bar{c}^2 \}$  имеет место при  $\delta = 0$ , что отмечено заливкой в табл. 1.

2. В окрестности номинальной частоты вращения ( $\delta = 0$ ) чувствительность  $\bar{c}^2$  к вариациям  $\delta$  невысока по сравнению с режимами выраженной гипо- или гипергравитации (пологий характер экстремума). Это позволяет не предъявлять повышенных требований к стабилизации частоты вращения ( $n$ ) на режимах, близких к номинальным.

3. На режимах выраженной гипо- или гипергравитации чувствительность  $\bar{c}^2$  к вариациям  $\delta$  существенно возрастает, что следует учитывать при планировании и выполнении сеансов вращения. Например, если при вариациях  $\delta$  в диапазоне  $\Delta\delta = 10\%$  в окрестности номинального режима ( $\delta \in [-5\%, +5\%]$ ) чувствительность, подсчитанная как отношение  $\Delta \bar{c}^2 / \Delta\delta$ , составляет по величине  $9 \cdot 10^{-3}$  ( $(1,10 - 1,01) / 10$ , строка 4 табл. 1, полужирное выделение символов), то в диапазоне управления  $\Delta\delta \in [-25\%, -15\%]$  отношение  $\Delta \bar{c}^2 / \Delta\delta = 1 \cdot 10^{-1}$  ( $(2,71 - 1,69) / 10$ , полу-

жирное выделение), т.е. на два порядка больше.

4. В отличие от критерия  $\delta$ , построенного на учёте физических закономерностей систем «человек – ЦКР», критерий  $C^2$  не распознаёт режимы гипо- и гипергравитации. Этот результат следует из

числителя формулы (3), а его наглядной иллюстрацией служит рис. 3. Так, например,  $\bar{c}^{-2} \sim 1,5$  как в области гипогравитации ( $\delta = -15\%$ , строка 3 табл. 1), так и в области гипергравитации ( $\delta = +15\%$ ).

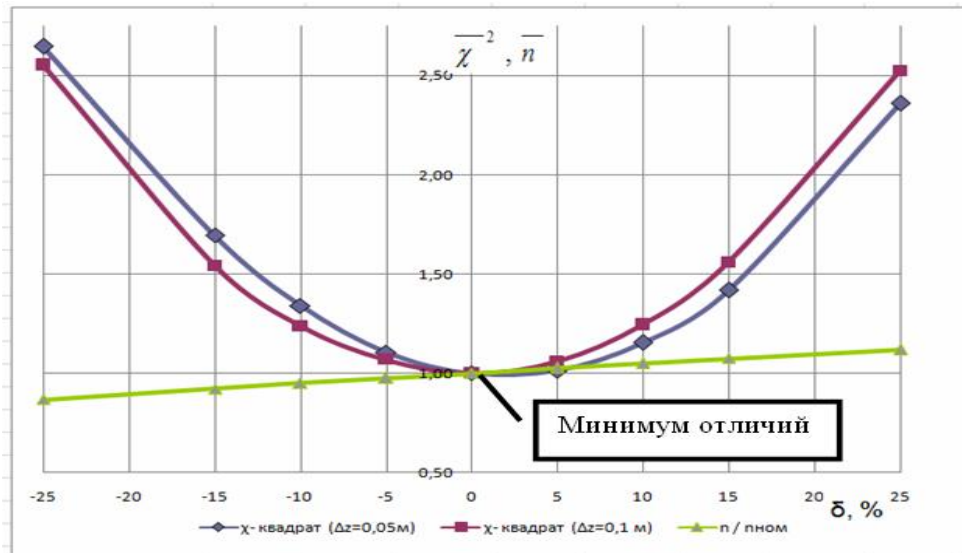


Рис. 3. Зависимость относительных величин  $\bar{c}^{-2}$  и  $\bar{n}$  от  $d$

Таблица 1. Типовые зависимости относительных величин  $\bar{c}^{-2}$ ,  $\bar{n}$  от  $\delta$

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\delta, \%$	-25	-15	-10	-5	0	5	10	15	25
$\bar{c}^{-2}$ ( $\Delta z=0,1\text{ м}$ )	2,55	1,54	1,24	1,07	1,00	1,06	1,25	1,56	2,52
$\bar{c}^{-2}$ ( $\Delta z=0,05\text{ м}$ )	2,71	1,69	1,34	1,10	1,00	1,01	1,15	1,42	2,36
$\bar{n} = n/n_{ном}$	0,87	0,92	0,95	0,98	1,00	1,03	1,05	1,07	1,12
Уровень воздействия	Гипогравитация				Минимум отличий	Гипергравитация			

**Регрессионный анализ распределений**, включённый в теоретико-множественный подход в качестве составной части, представляет интерес по следующим основаниям:

- аппроксимации кривых второго порядка линейными регрессиями упрощают оценку изменчивости распределений давления за счёт осреднения и тем самым упрощают медицинскую трактовку

и использование выявленных закономерностей;

- уравнения линейной регрессии позволяют выявить режимы ЦКР, имитирующие в среднем естественный темп приращения гидростатического давления по координате  $Z$ , характерный для нормы (Земля), что важно для медицинских приложений.

Результаты исследований с использованием регрессионного анализа выявили следующие закономерности:

1. В относительно широком диапазоне управления ( $\delta \in [-15\%; +15\%]$ ) вариации углов наклона линий регрессий ( $\alpha$ ) не превышают по значению  $1,5^\circ$ , что в пересчёте в относительные единицы составляет менее 2 % (для Земли  $\alpha = 84^\circ 11'$ ).

2. Указанная стабильность свидетельствует о существовании тесной связи между всеми парами распределений, обусловленными как ЕСТ, так и ИСТ.

3. На ЦКР в среднем моделируется скорость приращения давления, обусловленная земной гравитацией, что в определённой степени объясняет положительный эффект ИСТ.

4. Наилучшее приближение к норме по приращению давления обеспечивает режим гипогравитации  $\delta = -15\%$  ( $\alpha = 84^\circ 16'$ ).

**Заключение.** Таким образом, исследования, проведённые на втором и четвёртом этапах, позволяют сформулировать следующие результаты и выводы.

1. Разработана методика верификации энергетического критерия адекватности ИСТ (ЦКР) и ЕСТ (Земля), основу которой составляет теоретико-множественный подход, включающий в себя критерий  $c^2$  и регрессионный анализ.

2. Получено подтверждение того, что при  $\delta = 0$  различия ИСТ и ЕСТ (Земля) минимальны, причём подтверждение носит как качественный, так и количественный независимый характер, поскольку критерии  $c^2$  и  $\delta$  построены на различных принципах.

3. В отличие от формального критерия  $c^2$  и общепринятого в промышленности параметра  $+Gz$ , предлагаемый критерий осуществляет более детальную оценку адекватности ИСТ и ЕСТ, поскольку позволяет определить режимы их адекватности ( $\delta = 0$ ) и осуществить разграничение режимов вращения на гипо ( $\delta < 0$ ) и гипергравитацию ( $\delta > 0$ ), что важно для

космической и восстановительной медицины.

4.  $\delta$  - критерий построен на непрерывных моделях состояний объектов воздействия и поэтому, в отличие от критерия  $c^2$ , не зависит от шага дискретизации по координате  $Z$ . Кроме того, он не зависит от рода жидкости, содержащейся в объекте воздействия, что важно с точки зрения планирования экспериментов и назначения процедур в гравитационной терапии.

5. Трактовки результатов непараметрического анализа в виде суммарного относительного отклонения двух распределений (3) и линий регрессии понятны медицинскому персоналу как пользователю моделей ИСТ, реализованных в компьютерных технологиях.

Результаты, полученные на основе теоретико-множественного подхода, доказывают правомерность использования  $\delta$ -критерия при решении задач сходства / различий ИСТ и ЕСТ.

### Библиографический список

1. Акулов, В.А. Теоретико-множественный подход к верификации моделей мехатронных систем «человек – короткорadiusные центрифуги наземного и космического применения» [Текст] / В.А. Акулов, В.Л. Балакин // Сб. тр. Международного научно-технического форума, посвящённого 100-летию ОАО «Кузнецов» и 70-летию СГАУ. Самара. СГАУ, 5-6 сентября 2012. – С. 241 – 243.

2. Галкин, Р. А. Применение гравитационных перегрузок в терапии облитерирующего атеросклероза нижних конечностей [Текст] / Р. А. Галкин, Г. П. Котельников, И. В. Макаров // Вестн. хирургии. – 2003. – №1. – С.82 - 85.

3. Котовская, А. Р. Медико-биологические аспекты проблем создания искусственной силы тяжести [Текст] / А. Р. Котовская, А. А. Шипов, И. Ф. Виль-Вильямс. – М.: Слово, 1996.

4. Лебедев, В. В. Моделирование полета на Марс на околоземной орбите [Текст] / В. В. Лебедев // Вестн. РАН. – 2010. – Т.80, №11. – С.1000 – 1010.

5. Анфилатов, В.С. Системный анализ в управлении [Текст]: учеб. пособие / В.С. Анфилатов, А.А. Емельянов, А.А.

Кукушкин; под ред. А.А. Емельянова. – М.: Финансы и статистика, 2006.

6. Акулов, В. А. Мехатронные системы генерации искусственной силы тяжести наземного и космического применения [Текст] / В. А. Акулов. – М.: Машиностроение, 2011.

## VERIFYING MODELS OF MECHATRONIC SYSTEMS «MAN-CENTRIFUGE» FOR GROUND AND SPACE USAGE ON THE BASIS OF SET THEORY

© 2013 G.P. Anshakov<sup>2</sup>, V. A. Akulov<sup>1</sup>, V. L. Balakin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University)

<sup>2</sup>State Research and Production Space Center «TsSKB-Progress», Samara

The paper presents the results of verification of the proposed criterion for assessing the adequacy of artificial gravitation and Earth gravitation. The validity of using this criterion in solving the similarity /dissimilarity problems of artificial gravitation and Earth gravitation is shown.

*Mechatronic system “man-centrifuge”, model, criterion, verification, set theory.*

### Информация об авторах

**Аншаков Геннадий Петрович**, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заместитель генерального конструктора, ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ - Прогресс», г. Самара. Область научных интересов: космическое аппаратостроение, процессы управления.

**Акулов Владислав Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: космическое аппаратостроение, процессы управления.

**Балакин Виктор Леонидович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры космического машиностроения, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [balakin@ssau.ru](mailto:balakin@ssau.ru). Область научных интересов: динамика полёта и управление движением летательных аппаратов, космическое машиностроение.

**Anshakov Gennady Petrovich**, doctor of technical science, professor, deputy general designer, Space Rocket Center «TsSKB-PROGRESS». Area of research: space engineering, control processes.

**Akulov Vladislav Alexeevich**, candidate of technical science, associate professor, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). Area of research: space engineering, control processes.

**Balakin Victor Leonidovich**, doctor of technical science, professor, professor of the department of space engineering, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [balakin@ssau.ru](mailto:balakin@ssau.ru). Area of research: flight dynamics and flying vehicle motion control, space engineering.