

УДК 004.415+519.673+531.5

## ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ ГРАВИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

© 2009 В. А. Акулов

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 11.06.2009

Разработана специализированная информационная система (АИСОА), ориентированная на решение задач гравитационного моделирования протяженных объектов на мехатронных комплексах, генерирующих управляемую искусственную силу тяжести. В основу системы положены авторские модели состояний объектов воздействий и критерии соответствия искусственной и естественной сил тяжести, построенные на принципах аналитической механики. АИСОА объединяет три функциональных компонента: физическое моделирование (собственно центрифуги), математические модели и информационную поддержку принятия решений.

Ключевые слова: гравитационное моделирование, мехатронные системы, информационная система, математическое моделирование, искусственная сила тяжести.

### ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Гравитационное моделирование (ГМ), под которым понимается применение искусственной силы тяжести (ИСТ) к исследованию природных и рукотворных объектов, нашло широкое применение в различных предметных областях. Примерами служат испытания и тарировки приборов ответственного назначения (центробежные стенды), исследования прочности объектов в строительстве и горном деле, отбор и подготовка экипажей скоростных самолетов и космических аппаратов, лечение больных травматологического и неврологического профиля и т. д. Планируется применение ИСТ в Космосе в качестве инструмента научных исследований и противодействия невесомости, что важно для успешного выполнения длительных и сверхдлительных полетов, включая межпланетные миссии [1] - [5].

ГМ выполняется на стендах, представляющих собой сложные мехатронные комплексы, включающие в себя центробежную машину, систему управления и информационную систему. Как известно, любая модель, а ГМ является одной из ее физических разновидностей, требует оценки адекватности, поскольку она (модель) представляет собой упрощенный “аналог оригинала” [5]. Рассмотрим эту задачу применительно к моделированию естественной силы тяжести (ЕСТ), которая актуальна в целом ряде приложений. Главные из них – пилотируемая космонавтика и гравитационная терапия [2 - 5].

*Акулов Владислав Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры “Информационные технологии”. E-mail: vanger@it.samgtu.ru.*

На рис. 1 представлены структуры ЕСТ (Земля, Марс, Луна) и ИСТ, генерируемой короткорadiусной центрифугой (ЦКР). Здесь:  $+Gz$  – модуль перегрузки, создаваемой ИСТ и ЕСТ;  $z$  – продольная координата, отсчитываемая, соответственно, от поверхности планеты или оси вращения;  $h$  – протяженность объекта в направлении  $oz$ ;  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора ЦКР, где  $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$ .

Как видно, адекватность в форме баланса перегрузок достигается только в точках пересечения характеристик: горизонталей (ЕСТ) и семейства наклонных  $\omega_i$  (ИСТ). В остальных точках баланс отсутствует, причем по мере их удаленности рассогласование только возрастает. Следовательно, ЦКР осуществляет адекватность, которую можно классифицировать как весьма условную, точечную.

В связи с условностью адекватности следует различать две группы объектов ГМ: точечные и распределенные. Под точечными (ТО) понимаются объекты, размеры которых столь малы по сравнению с радиусом вращения, что внутренним перепадом перегрузок можно пренебречь и считать поле ИСТ однородным. Если же размеры объектов соизмеримы с радиусом, то перепад становится значительным, и такие объекты далее отнесены к категории протяженных (ПО). Как следует из рис. 1, а для этого достаточно проанализировать изменение  $+Gz$  на интервале  $z/h = [0, 1]$ , относительная величина перепада перегрузок в ПО достигает 100%.

Отметим, что переход по схеме “ТО - ПО” сопровождается следующими качественными изменениями. *Во-первых*, величина и точка при-

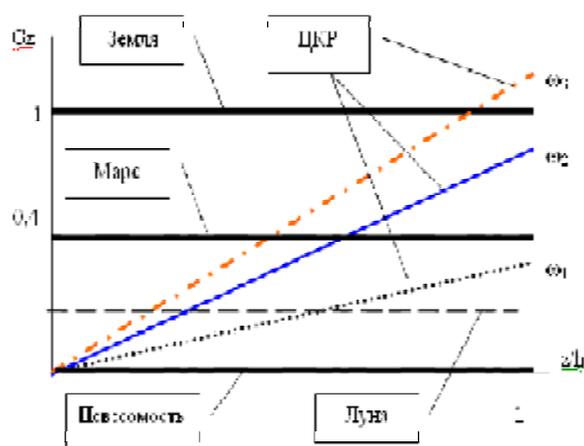


Рис. 1. Структурные различия ИСТ и ЕСТ

ложения перегрузок при ГМ становятся неопределенными. Во-вторых, перегрузка утрачивает критериальные функции и переходит в разряд промежуточных параметров. В-третьих, процедуры оценки адекватности усложняются. Вследствие перечисленных и им подобных факторов информационное обеспечение ГМ, построенное на “точной” идеологии, становится недостаточным. Особую актуальность приобретает комплекс задач по разработке методологии, ориентированной на оценку и обеспечение адекватности ИСТ и ЕСТ применительно к ПО.

В качестве решения указанной задачи предлагается проблемно-ориентированная автоматизированная информационная система по оценке адекватности (АИСОА) [6-8]. В целях сокращения изложения ограничимся анализом структурной схемы АИСОА (рис. 2), краткой характеристикой решаемых задач и математических моделей, представленных в конечной форме и реализованных в АИСОА. В качестве объектов ГМ выбрано весьма представительное подмножество ПО, содержащих протяженные гидравлические тракты [6].

### КОНЦЕПЦИЯ АИСОА

В основу концепции АИСОА положен принцип воспроизведения состояний объектов, а не параметров векторного поля ЕСТ. Предусмотрено, что на этапах, предшествующих ГМ, такие параметры определяются методом компьютерного моделирования. Кроме того, учтено, что в ряде приложений в сеансах вращения принимает непосредственное участие человек (космонавт, испытатель, пациент гравитационной терапии). Это потребовало разработки мер по обеспечению параметрической безопасности. В итоге АИСОА приобрела двухуровневую иерархическую структуру, объединяющую в себе три функциональных компонента: физическое моделирование, т. е. соб-

ственно ГМ (см. уровень I, рис. 2), математическое моделирование, обеспечивающее ГМ входными данными (поз. 3), и информационную поддержку принятия решений (поз. 4), образующие структуру, обозначенную как “Уровень II”.

Серия задач моделирования, названных, исходя из математического смысла, прямыми (поз. 3.1), заключается в оценке адекватности ИСТ и ЕСТ (сходства, степень различий). Обратные задачи (поз. 3.2) состоят в определении индивидуализированных режимов испытаний, обеспечивающих либо минимум отличий, из числа возможных (поз. 3.2.1), либо заданные, причем разнонаправленные рассогласования (поз. 3.2.2). Как прямые, так и обратные задачи решены в 2-х постановках: интегральной и локальной (см. ниже).

### ПРЯМЫЕ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ПОСТАНОВКЕ

Указанные задачи решаются с помощью критерия адекватности вида [6], [8]:

$$\delta = \frac{S_2 - S_1}{S_1} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Здесь  $S_1, S_2$  – приращение потенциальной энергии жидкости, заключенной в гидравлическом тракте объекта, обусловленное действием силы тяготения и центробежной силы соответственно.

В качестве обоснования правомерности предлагаемого подхода укажем на два обстоятельства. Известно, что именно жидкие среды в наибольшей степени откликаются на изменение гравитационной нагрузки. Кроме того, одним из фундаментальных положений аналитической механики (АМ) является положение об эквивалентности сил гравитации и центробежных сил инерции. К числу его проявлений относится линейная зависимость сил от массы [9]. Модели, применяемые в АМ, после некоторой модификации позволяют определить величины  $S_i$ . После их подстановки в (1) получим

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

Здесь  $\beta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий многообразие видов ЕСТ (Земля, Марс, Луна, др. варианты).  $\beta = a / g$ , где  $a, g$  – ускорение свободного падения, соответственно, на одной из планет и на Земле. Остальные обозначения и упрощенный вариант расчетной схемы приведены на рис. 3.

Таким образом, физический смысл критерия (2) состоит в сопоставлении энергии, полученной жидкостью, заключенной в объекте, как со стороны естественной, так и искусственной гравитации (эффект бустера) [6] – [8].

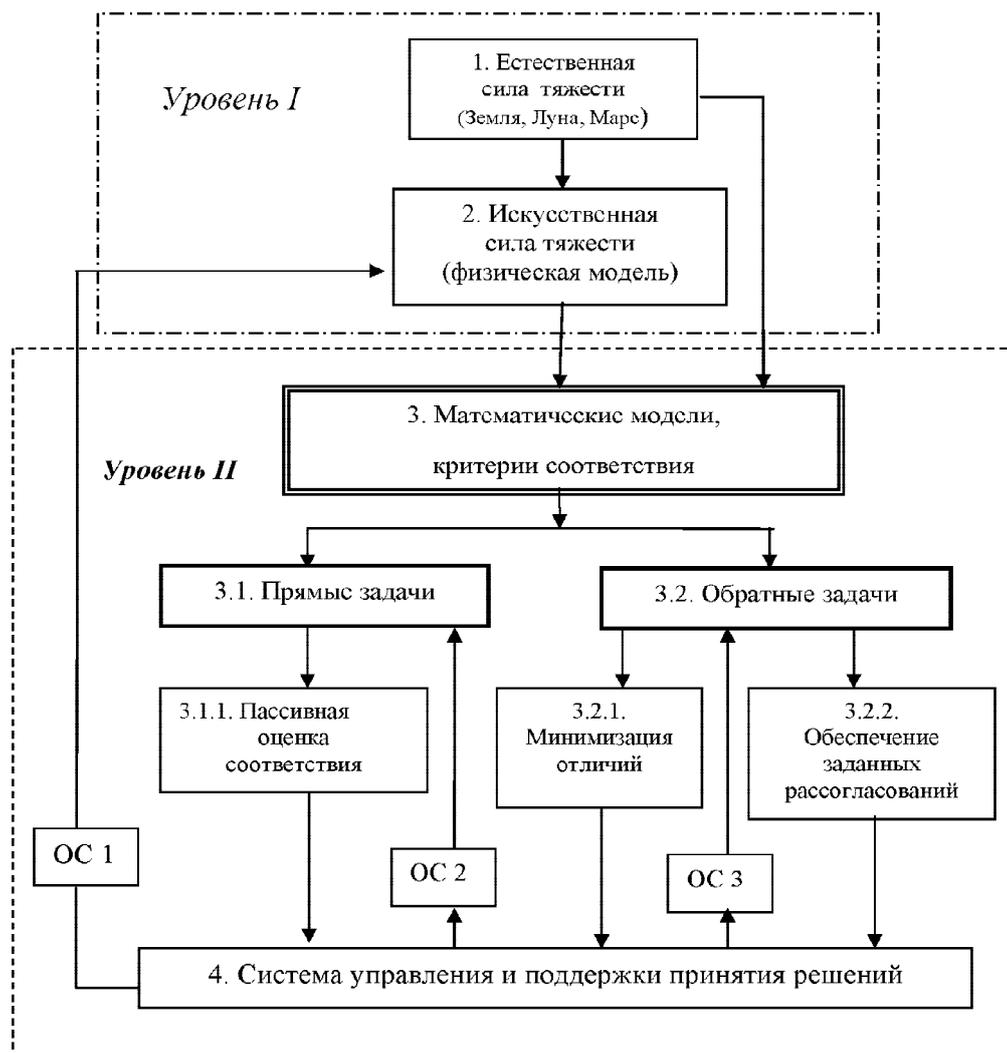


Рис. 2. Структурная схема АИССОА для оценки адекватности ИСТ и ЕСТ

Возможны три случая, отличающиеся величиной и знаком  $\delta$ . Если  $\delta = 0$ , имеет место адекватность, под которой понимается минимум отличий из числа возможных, оценивая их с энергетических позиций. Если  $\delta < 0$ , ЦКР сообщает объекту меньше энергии, чем ЕСТ, а если  $\delta > 0$ , соотношение изменяется на прямо противоположное.

Отметим следующие наиболее важные моменты. Во-первых, моделирование по формуле (2) означает пассивную оценку, т. е. регистрацию состояний ПО, при заданных испытателями параметрах всей системы, включая ЦКР и объект ГМ.

Во-вторых, в (2) учитывается распределение жидкости и ее “энерговооруженность” на всем протяжении гидравлического тракта, что и послужило основанием для названия – “интегральная оценка”.

В-третьих, перегрузка  $+G_z$  переместилась в категорию промежуточных параметров и, что особенно важно, в частный случай предлагаемого критерия (2). Последнее утверждение следует

из (2) при  $R_1 = 0$ :  $\delta = \left( \frac{+G_z^{\max}}{3\beta} - 1 \right) 100\%$ .

Здесь  $+G_z^{\max} = \omega^2 h / g$  – перегрузка на периферийном радиусе  $z = h$  (см. рис. 3).

Следует обратить особое внимание на то, что при отсутствии полноценного критерия адекватности ИСТ и ЕСТ, параметр  $+G_z^{\max}$  нашел самое широкое применение в различных приложениях, в том числе, космических [1 - 3].

Модель (2) реализована в блоке 3.1.1 АИССОА (рис. 2) с визуализацией результатов на экране ПК в виде типового окна (рис. 4). Особо отметим, что предлагаемый интерфейс обеспечивает режим массового решения задач по оценке адекватности ИСТ и ЕСТ, что важно с точки зрения практической значимости с учетом множества ПО и множества предметных областей.

### ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ПОСТАНОВКЕ

Такие задачи заключаются в определении индивидуализированных режимов ГМ, обеспечивающих адекватность ИСТ и ЕСТ. Под этим понимаются два состояния объектов ГМ: либо

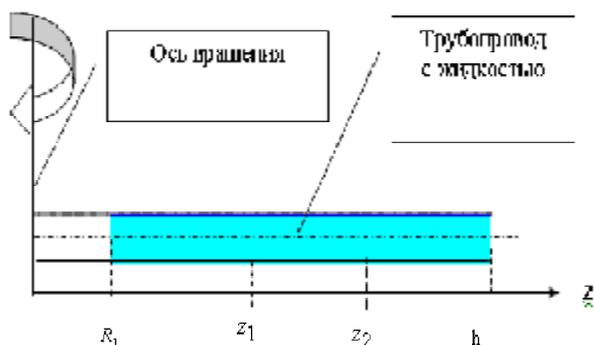


Рис. 3. Схема обозначений, принятых в (1) – (4)

соответствие ИСТ и ЕСТ (энергетический баланс:  $\delta = 0$ , см. поз. 3.2.1, рис. 2), либо заданные уровни рассогласований ( $\delta < 0$  или  $\delta > 0$ , см. поз. 3.2.2). Моделирование выполняется по формуле (43), которая получена разрешением (2) относительно  $\omega$ , что и определило название задач – “обратные”.

$$\omega = \pm 5,425 (h - R_1) \sqrt{\frac{\beta(1 + 0,01\delta)}{h^3 - R_1^2(3h - 2R_1)}} \cdot (3)$$

Отметим следующие наиболее важные моменты. Во-первых, модель (3) устраняет неопределенность “точечного” подхода к оценке адекватности ГМ в случае ПО. Она однозначно определяет режимы испытаний, обеспечивающие разнообразие требований, предъявляемых к ГМ, осуществляющему моделирование ЕСТ. В их числе: множество объектов, отличающихся габаритами и расположением на столе ЦКР; множество их состояний ( $\delta$ ); многообразие планет

( $\beta$ ); промежуточные варианты  $\beta$ . Во-вторых, для получения оптимального режима, которому соответствует минимум отличий из числа возможных, достаточно в (3) положить  $\delta = 0$ . В-третьих, для получения заданного рассогласования ИСТ и ЕСТ, что важно с научно-практической точки зрения, достаточно в (3) положить соответствующее значение  $\delta$  с учетом величины и знака. С целью удобства применения (3) в АИСОА предусмотрен отдельный типовой экран, который, как и в случае прямых задач, обеспечивает массовость прогнозов.

### ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ГМ В ЛОКАЛЬНОЙ ПОСТАНОВКЕ

В целом ряде приложений необходима оценка адекватности ИСТ и ЕСТ на локальном участке гидравлической системы (см. рис. 3, интервал  $[z_1, z_2]$ , где  $R_1 \leq z_1 < z_2 \leq h$ ). Как следствие различий в законах распределения гидростатического давления (линейность) и инерционного давления (семейство парабол, смещенных относительно начала координат), взаимное расположение эпюр распределения давления отличается и количественным, и качественным разнообразием. Создается множество состояний объектов, когда интегральная оценка, а она усредняет энергию жидкости на интервале  $[R_1, h]$ , не совпадает с локальной оценкой. Опуская преобразования (интегрирование законов распределения давления на интервале  $[z_1, z_2]$ ),

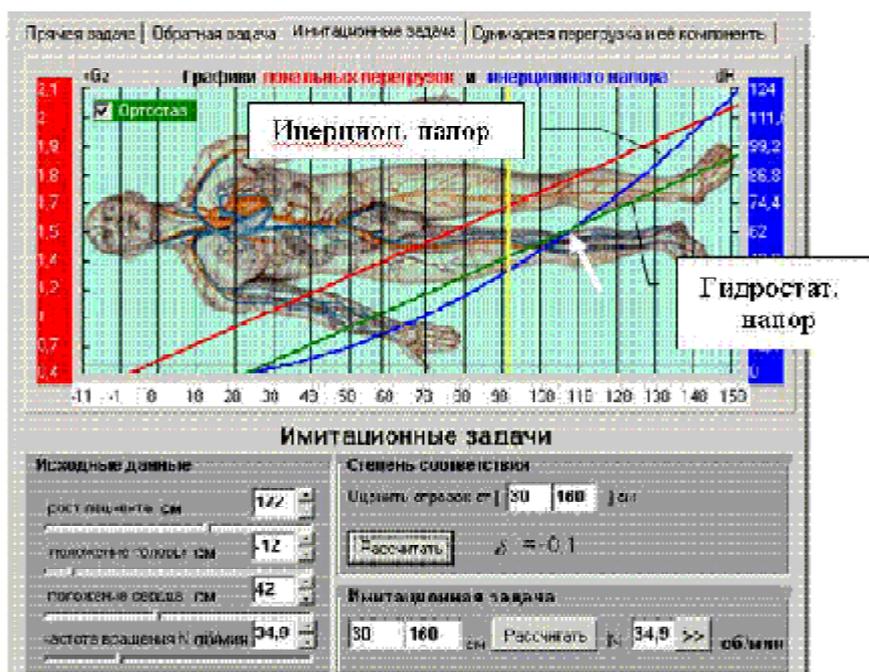


Рис. 4. Типовой экран АИСОА для решения прямых задач в интегральной и локальной постановке

приведем конечную формулу для оценки адекватности в локальной постановке:

$$\delta_{\text{лок}} = \left( \frac{\omega^2}{3g\beta} \frac{z_2^2 + z_2 z_1 + z_1^2 - 3R_1^2}{z_2 + z_1 - 2R_1} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (4)$$

Отметим, что модель (4) является аналогом (2). Она реализована в блоке 3.1.1 АИС (см. рис. 2) и для удобства пользователя решается на том же экране, что и интегральная задача (см. рис. 4).

С точки зрения ГМ особый интерес представляет задача, получившая наименование “обратной задачи в локальной постановке”. Для ее решения достаточно определить  $\omega$  из соотношения (4):

$$\omega_{\text{лок}} = \pm 5,425 \sqrt{\frac{\beta(z_2 + z_1 - 2R_1)(0,01\delta_{\text{лок}} + 1)}{z_2^2 + z_1 z_2 + z_1^2 - 3R_1^2}}. \quad (5)$$

Учитывая логическое сходство обратных задач (3) и (5) для их решения отведен один и тот же экран интерфейса пользователя.

### ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Рассматриваемый комплекс задач обладает особой актуальностью в ГМ с непосредственным участием человека в сеансах вращения как в условиях Земли, так и Космоса [2, 4, 6]. Результаты моделирования, а они включают в себя как перечисленные, так и некоторые другие данные, в частности эпюры распределения гидростатического и инерционного давления, распределения перегрузок (см. график на рис. 4), поступают в блок 4 АИСОА (рис. 2). На основании полученной информации ответственные исполнители ГМ принимают решение либо о проведении испытаний, которое по обратной связи (ОС1) передается на уровень физического моделирования (поз. 2), либо выполняют кор-

рекцию исходных данных с повторным моделированием (ОС2 или ОС3).

В заключение отметим, что апробация предлагаемой АИСОА на реальной информации, представленной Институтом медико-биологических проблем РАН, а он является одним из мировых лидеров по обеспечению пилотируемой космонавтики [2-4], показала ее высокую эффективность, научную новизну и практическую значимость.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлюченко С.В., Попов А.Н., Пуленец Н.Е., Тимофеев А.Н. Испытательные и градуировочные стенды // Научные исследования и инновационная деятельность: Материалы научно-практич. конф. СПб: СПбГПУ, 2006. С. 50-56.
2. Котовская А.Р., Виль-Вильямс И.Ф., Лукьянюк В.Ю. Проблема создания искусственной силы тяжести с помощью центрифуги короткого радиуса для медицинского обеспечения межпланетных пилотируемых полетов // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2003. Т. 37. №5. С. 36-39.
3. Котовская А.Р., Шипов А.А., Виль-Вильямс И.Ф. Медико-биологические аспекты проблемы создания искусственной силы тяжести. М: Слово, 1986. С. 203.
4. Mars-500 experiment // URL: <http://www.suzymchale.com/cosmonavtka/mars500.htm> (дата обращения 19.04.2009).
5. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: Мир, 1978. 418 с.
6. Акулов В. А. Биомеханический критерий адекватности модельной и естественной силы тяжести // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2005. Т. 39. №1. С. 59-61.
7. Акулов В.А. Оценка адекватности искусственной и естественной силы тяжести методами многомерного анализа // Вестник СамГТУ, серия “Физико - математические науки”. 2006. Вып. 42. С.174-178.
8. Акулов В.А. Теория графов в оценке соответствия искусственной и естественной сил тяжести (центрифуга, Земля, Луна, Марс) // SPEXP 2008: Сб. науч. тр. Международной научно-практической конференции 3-10 сентября 2008. Самара: СГАУ, Европ. Косм. агентство (ESA), 2008.
9. Седов Л.И. Механика сплошной среды. 5-е изд., испр. Т. 1. М.: Наука. 1994. 529 с. : ил

## HYDROMECHANICS AND INFORMATIONAL ASPECTS OF GRAVITATION SIMULATION FOR DISTRIBUTED OBJECTS

© 2009 V.A. Akulov

Samara State Technical University

We developed a special information system for solving the problems of gravitation simulation for distributed objects in mechanic and electronic complexes that generate controlled artificial gravity. The system is based on the author's models of state of the objects, that experience the action? And the criteria for adequacy of the artificial and natural gravities built on the principles of analytical mechanics. The system comprises three functional components: physical simulation (of a centrifuge itself), mathematical models and informational support for making decisions.

Key words: gravitation simulation, mechatronic system, information system, mathematical models, artificial gravity.