Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. А. Акулов, Физико-математические аспекты моделирования пониженных уровней гравитации, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2007, выпуск 2(), 189–191

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu558>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 54.157.27.8

26 апреля 2023 г., 17:09:41

УДК 681.51.012+004.93'1+004.8

В. А. Акулов

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОНИЖЕННЫХ УРОВНЕЙ ГРАВИТАЦИИ

В качестве инструмента имитации пониженных уровней гравитации, характерных для Луны и Марса, предлагается наклонная плоскость, на которой располагается испытуемый (космонавт). Такой приём назван «наклонной иммерсией». Выполнена адаптация известных математических моделей наклонной плоскости к специфике решаемых задач и их реализация в технологии вычислительных экспериментов. Выполнены расчётные исследования влияния массы навесного оборудования (скафандр и т.п.), силы трения на величину углов наклона, исходя из условий моделирования силовой нагрузки на опорно-двигательный аппарат. Даны практические рекомендации по установке компромиссных углов, исходя из обеспечения названных условий.

Введение. Перспективные программы освоения Космоса предусматривают длительное (многосуточное) пребывание человека на поверхности Луны и Марса, то есть в аномально низких гравитационных условиях. Так, например, ускорение свободного падения на Луне составляет всего 0,167 от нормы (земной величины), а на Марсе — 0,379. Многие проблемы, связанные с откликом организма человека на столь значительные отклонения гравитации от нормы, остаются недостаточно изученными [1]. В связи с этим весьма актуальны исследования, направленные на разработку физических моделей пониженной гравитации (стендов), реализуемых в условиях Земли, а также их математических аналогов. В результате сопоставления двух крайних поз человека, а именно — вертикальной и иммерсии (пребывание человека в горизонтальной позе на поверхности водного бассейна), то есть 100% гравитации (норма) и её отсутствие, можно заключить, что наклонные позы занимают промежуточное положение.

Предлагается решение, заключающееся в использовании наклонных плоскостей в качестве среды пребывания испытуемых (космонавтов), моделирующих пониженную гравитацию за счёт эффекта разложения сил. Процедура пребывания в такой среде названа «наклонной иммерсией» (НИ), а соответствующее оборудование — наклонным стендом (НС). В итоге возникает проблема научно-технического обоснования проектных параметров НС. Прежде всего, необходимо определение углов установки наклонной плоскости относительно горизонтали, обеспечивающих имитацию силовых нагрузок на опорно-двигательный аппарат человека (реакцию опоры R), характерных, например, для рассматриваемых планет. Наряду с этим речь идёт об имитации динамических режимов.

В настоящей работе решаются следующие задачи: разработка математической модели наклонной иммерсии, её реализация в виде интерфейса пользователей; выполнение серии вычислительных экспериментов по определению основных закономерностей статических и динамических режимов с учётом массы навесного оборудования и силы трения; выдача рекомендаций относительно выбора проектных параметров наклонных стендов (стола центрифуги).

Методика исследований. В качестве основного метода исследований выбрано математическое моделирование. Прежде чем составить расчётную схему, проанализируем возможные варианты НИ. Моделью вертикальной позы человека на поверхности планет (Луна, Марс) служат статические состояния, когда испытуемый располагается на наклонной плоскости, а его ступни — на упоре. Задача моделирования сводится к вычислению углов установки наклонной плоскости в зависимости от ускорений сил тяжести планет (Луна, Марс), а также увеличения массы испытуемого за счёт нештатного навесного оборудования, которое потребуется по медицинским и технологическим соображениям. Моделирование динамических режимов также сводится к определению углов установки, но с расширенным составом исходных данных. Необходим также учёт силы трения и фазы движения (подъём или спуск по наклонной плоскости). В соответствии с изложенным, расчётная схема наклонной иммерсии представлена на рис. 1. Для определённости изображено движение вниз. Здесь $\vec{F}$ — вертикальная сила, модуль которой в контексте НИ представляется декомпозицией вида:

Рис. 1. Расчётная схема наклонной иммерсии

$$F = (m + m_t)g, \quad (1)$$

где m — масса человека со штатным навесным оборудованием (скафандр и т. п.); m_t — масса нештатного навесного оборудования (дополнительные приборы, тележка для перемещений и т. п.); g — ускорение силы тяжести на Земле; $\vec{F}_{\text{ск}}$ — сила, параллельная наклонной плоскости. Именно она используется в НИ для создания частичной гравитации. Её модуль — $F_{\text{ск}} = (m + m_t)g \sin \alpha$. $\vec{N}$ — нормальная к поверхности составляющая силы $\vec{F}$, причём $N = F \cos \alpha$. $\vec{F}_{\text{тр}}$ — сила трения, модуль которой имеет вид $F_{\text{тр}} = \mu N = \mu(m + m_t)g \cos \alpha$, где μ — коэффициент трения.

По условиям моделирования пониженных уровней гравитации разность сил, параллельных наклонной плоскости, а это является основным положением настоящей научной разработки, должна равняться силе тяжести на соответствующей планете:

$$(m + m_t)(\sin \alpha - \mu \cos \alpha) = \beta m, \quad (2)$$

где β — коэффициент, характеризующий частичную гравитацию и равный отношению силы тяжести объекта на исследуемой планете к земной силе тяжести. Его значения составляют в невесомости, на Земле, Марсе и Луне соответственно 0; 1; 0,379; 0,167. Это, в частности, означает, что в статике реакция опоры НС равна весу тела на соответствующей планете.

Введём в рассмотрение коэффициент $\gamma = \frac{m_t}{m}$, характеризующий долю массы нештатного навесного оборудования по отношению к суммарной массе человека и штатного оборудования. Тогда (2) примет вид

$$(1 + \gamma)(\sin \alpha - \mu \cos \alpha) = \beta. \quad (3)$$

Здесь β назначается из условия моделирования, а угол α вычисляется исходя из величин γ и μ . Исключим ситуацию, известную в теоретической механике как самоторможение. В случае её наступления динамические режимы становятся невозможными, что существенно снижает эффективность НИ. Это означает, что в рабочем диапазоне углов установки должно выполняться условие $\alpha \geq \alpha_{\text{кр}}$, где α , $\alpha_{\text{кр}}$ — соответственно текущий угол установки плоскости (рис. 1) и критические значения углов, определяемые из известного условия $\alpha_{\text{кр}} = \arctg \mu$. Типовые примеры $\alpha_{\text{кр}}$, необходимые для дальнейшего анализа, приведены на рис. 2 (линия 1).

Решение уравнения (3) имеет вид

$$\alpha = \arcsin \frac{\beta}{(1 + \gamma^2)\sqrt{1 + \mu^2}} \pm \arccos \frac{1}{\sqrt{1 + \mu^2}}. \quad (4)$$

Здесь знаки « $\pm$ » относятся соответственно к фазам спуск по наклонной «плоскости» и «подъём». В отличие от известных моделей наклонной плоскости данная модель стала зависимой от массы тела (γ), что обусловлено необходимостью декомпозиции силы F (см. формулу (1)).

Результаты вычислительных экспериментов. В соответствии с поставленными задачами модель (4) реализована в интерфейсе пользователя, обеспечивающим режимы вычислительных экспериментов. Была выполнена серия из пяти экспериментов, два из которых относились к режиму статики, а три — динамики.

Серия 1. В этой серии определялись базисные углы установки, соответствующие статическому режиму ($\mu = 0$) и отсутствию нештатного навесного оборудования ($\gamma = 0$). Результаты моделирования приведены в таблице (колонка 2, числитель дроби) и на рис. 2 (точки, расположенные на оси ординат). Как видно, в статике моделирование марсианской и лунной гравитации достигается при углах наклона относительно горизонта около 22° и 10° соответственно.

Так как режим самоторможения не наступил, реакция опоры (R) обеспечивает имитацию силовой нагрузки на опорно-двигательный аппарат в условиях планет.

Серия 2. Исходные данные: статика, $\mu = 0$, γ — переменная величина. В целях сокращения объёма изложения приведём результаты только для одного значения $\gamma = 0,1$ (табл., колонка 2, знаменатель). Как видно, увеличение массы испытуемого на 10 % потребовало уменьшения углов установки примерно на 2° по позиции «Марс» и на 1° по позиции «Луна».

Рис. 2. Влияние трения на углы установки наклонной плоскости ($\gamma = 0$)

Влияние коэффициентов μ и γ на углы установки α . Фаза спуска

Коэффициент трения μ	0	0,03	0,05	0,08	0,1	0,12	0,15
Моделирование Марса (α , град)	22,3 / 20,2	24 / 21,9	25,1 / 23	26,8 / 24,7	27,9 / 25,8	28,9 / 26,9	30,5 / 28,5
Моделирование Луны (α , град)	9,6 / 8,7	11,3 / 10,4	12,5 / 11,6	14,1 / 13,3	15,3 / —	16,4 / —	18 / —

Серия 3. предусматривала оценку зависимости углов установки от коэффициента трения в фазу спуска (динамический режим). Исходные данные: $0 < \mu \leq 0,15$, $\gamma = 0$. Результаты исследований приведены в таблице (колонки 3–8, числитель) и на рис. 2. Как видно, с ростом силы трения в фазу спуска следует увеличивать углы установки плоскости примерно в 1,5 раза по позиции «Марс» (линия 4) и 2 раза по позиции «Луна» (линия 3).

Серия 4. В этой серии также решались динамические задачи (см. серия 3), но в фазу подъёма. Из всего многообразия полученных результатов в качестве иллюстрации на рис. 2 приведена зависимость α от μ для позиции «Луна» (пунктирная линия). Обращают на себя внимание два обстоятельства. Во-первых, в фазу движения вверх следует уменьшать углы установки плоскости на ту же величину, что и увеличение в фазу спуска. Во-вторых, в случае $\mu \geq 0,08$ наступает самоторможение, исключающее реализацию динамического режима по позиции «Луна».

Таким образом, в результате вычислительных экспериментов установлено, что трение является основным фактором, затрудняющим реализацию процедур НИ. Одним из выходов из создавшегося затруднения состоит в применении системы качания наклонной плоскостью. Это означает оснащение стенда быстродействующей системой качания (привод, датчики положения плоскости и испытателя, система управления и т. д.), что не технологично. Другой выход состоит в принятии радикальных мер по минимизации силы трения. Как следует из приведённых оценок, от системы качания можно отказаться при $\mu < 0,03$ (см. рис. 2, колонки 2, 3 таблицы). Решение подобной задачи для современной триботехники не проблематично [2, 3]. В частности, трение качения со смазкой уверенно обеспечивает требуемый диапазон μ .

Серия 5. В этой серии исследовалось влияние веса нештатного навесного оборудования, к числу которого относится тележка (см. серия 4), на углы установки наклонной плоскости в динамическом режиме. В качестве примера в таблице (колонки 2–8, знаменатель дробей) приведены результаты моделирования, соответствующие 10% увеличению веса ($\gamma = 0,1$). В связи с тем, что при $\mu > 0,08$ по позиции «Луна» наступает самоторможение, в колонках 6–8 данные отсутствуют. Как видно, 10% увеличение веса следует компенсировать в фазу спуска за счёт уменьшения α примерно на 2° по позиции «Марс» и на 1° по позиции «Луна».

Таким образом, предложена методология имитации в наземных условиях пониженных уровней гравитации, характерных для Луны и Марса, в виде неподвижной или качающейся наклонной плоскости. Разработана математическая модель и выполнена серия вычислительных экспериментов, в ходе которых определены основные параметры наклонного стенда, реализующего заданные уровни пониженной гравитации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Котовская, А.Р. Медико-биологические аспекты проблемы создания искусственной силы тяжести [Текст] / А.Р. Котовская, А.А. Шипов, И.Ф. Виль—Вильямс. — М: Слово, 1996. — 204 с.
2. Физический энциклопедический словарь [Текст] / Под. ред. А.М. Прохорова. — М: Сов. Энциклопедия, 1984. — С. 767.
3. Трение, изнашивание и смазка [Текст] / Под ред. И.В. Кругельского. — М: Машиностроение, 1979. — Кн. 1. — С. 320.