

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Александра Сергеевича Панева
«Исследование движения тела по горизонтальной плоскости под влиянием перемещения
внутренней массы», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика

Объект исследования диссертационной работы А.С. Панева – вибрационная локомоционная система, состоящая из жесткого корпуса, моделируемого абсолютно твердым телом, и дебалансного вибровозбудителя, расположенного внутри корпуса. Дебалансный вибровозбудитель – это ротор, вращающийся вокруг оси, жестко связанной с корпусом, причем центр масс ротора не лежит на оси его вращения. Корпус системы имеет форму прямоугольного параллелепипеда, одна из граней которого лежит на жесткой горизонтальной плоскости, по которой движется локомоционная система. Будем называть эту грань нижним основанием, параллельную ей грань – верхним основанием, а остальные грани – боковыми гранями корпуса. Ось вращения вибровозбудителя проходит через центр масс корпуса и перпендикулярна одной из его боковых граней. Предполагается, что центр масс ротора лежит в плоскости, проходящей через центр масс корпуса и перпендикулярной оси вращения ротора, а ось вращения ротора есть его главная ось инерции. В этом случае вибровозбудитель можно моделировать материальной точкой, движущейся относительно корпуса по окружности заданного радиуса вокруг оси вращения ротора вибровозбудителя; масса материальной точки равна массе ротора. Описанная система может совершать движения, при которых корпус перемещается поступательно вдоль прямой, перпендикулярной оси вращения вибровозбудителя. Именно такие движения исследуются диссертантом. Предполагается, что между корпусом и плоскостью, по которой он движется, действуют кулоново сухое трение и линейное «вязкое» трение. Предполагается, что вибровозбудитель вращается с постоянной скоростью и что движение системы происходит без отрыва корпуса от поверхности перемещения.

Цель диссертационного исследования – дать классификацию возможных движений описанной локомоционной системы, определить области в пространстве параметров системы, отвечающие движениям каждого класса, и изучить основные свойства и особенности этих движений. Данная проблема представляется актуальной. К локомоционным системам вибрационного принципа действия имеется значительный интерес у инженеров, разрабатывающих миниатюрные мобильные роботы, перемещающиеся без внешних движителей за счет движения внутренних тел при контакте корпуса робота с внешней сопротивляющейся средой. Такие роботы просты конструктивно, не требуют сложных механизмов для передачи движений от двигателей к движителям, их корпус может быть сделан герметичным и геометрически гладким, без выступающих деталей. Последнее обстоятельство делает перспективным использование вибрационных роботов в «ранимых» средах, например для перемещения в тонких трубах с внутренней поверхностью, покрытой защитным слоем, целостность которого не должна быть нарушена, или внутри тела человека для доставки диагностического датчика или медикамента к пораженному участку. Динамические свойства локомоционных систем вибрационного принципа действия и принципиальные возможности управления такими системами к настоящему времени изучены недостаточно полно, что препятствует прогрессу в создании эффективных и надежных вибрационных роботов для выполнения различных технических задач. Решение задач, поставленных в диссертации А.С. Панева, вносит заметный вклад в создание научных основ механики локомоционных систем вибрационного принципа действия. По своему

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ

Вх. № 2
09.12.2018г.

содержанию и методике решения эти задачи относятся к теоретической механике. Таким образом, диссертация А.С. Панева актуальна с научной и инженерной точек зрения и вполне соответствует специальности 01.02.01 – Теоретическая механика.

Основной материал диссертации изложен в трех разделах. В **разделе 1** исследуется поведение рассматриваемой механической системы в предположении, что в начальный момент времени скорость корпуса относительно поверхности перемещения равна нулю, а вибровозбудитель находится в определенном положении, при котором проекция центробежной силы вращения вибровозбудителя на направление движения корпуса равна по величине максимальной силе сухого трения. Введением безразмерных переменных число параметров, определяющих поведение системы, снижается до трех. Эти три параметра суть отношение силы тяжести, действующей на всю систему к величине центробежной силы вращения вибровозбудителя, отношение коэффициента линейного демпфирования к произведению полной массы системы на величину угловой скорости вращения вибровозбудителя и коэффициент сухого трения. Сначала рассматривается поведение системы в отсутствие вязкого трения. В плоскости двух параметров системы выделяются три области, в которых движение системы носит качественно различный характер. В одной из областей корпус системы совершает периодическое движение с периодом, совпадающим с периодом вращения вибровозбудителя, причем на периоде имеются два интервала «залипания» корпуса, на которых его скорость равна нулю; средняя скорость движения локомотивной системы в этой области равна нулю. В другой области скорость движения корпуса изменяется периодически с периодом, совпадающим с периодом вращения вибровозбудителя, при этом за каждый период корпус перемещается на определенное расстояние в одном и том же направлении; в этой области на периоде имеется только один интервал залипания корпуса. Наконец, в третьей области скорость корпуса изменяется по неперiodическому закону и движение происходит без залипания с дрейфом в определенном направлении. Направление дрейфа во второй и третьей областях зависит от направления вращения вибровозбудителя. Аналогичная картина наблюдается и в случае наличия вязкого трения наряду с сухим трением, только три области, в которых движение имеет качественно различный характер, определяются не на плоскости, а в трехмерном пространстве параметров.

В **разделе 2** анализируются интегральные кривые уравнения движения рассматриваемой локомотивной системы в каждой из построенных в предыдущем разделе областей плоскости параметров. Показано, что в двух из этих областей любое движение системы за конечное время выходит на соответствующие периодические движения, построенные в разделе 1, а в третьей области существует периодическое движение, к которому асимптотически сходится любое движение системы.

В **разделе 3** исследования, аналогичные проведенным в разделе 2, проведены для случая, когда на корпус со стороны поверхности по которой движется система, кроме сухого кулонова трения действует линейное вязкое трение. Методика исследования и математический аппарат, использованные в разделе 3, аналогичны использованным в разделе 2.

Диссертация А.С. Панева представляет собой законченную научно-квалификационную работу, посвященную проблемам механики локомотивных систем вибрационного принципа действия. Работа выполнена на высоком научном уровне. В ней детально изучена динамика локомотивной системы с дебалансным вибровозбудителем, корпус которой перемещается вдоль прямой на плоскости, в предположении, что между корпусом и

плоскостью действуют сухое кулоново трение и линейное вязкое трение, а ротор вибровозбудителя вращается с постоянной скоростью. Этот случай представляет интерес как с научной точки зрения, так и с позиции возможных приложений, так как вращение ротора с постоянной скоростью – «естественный» режим вибровозбуждения, который должен быть всесторонне исследован для построения теории локомоционных систем с вибрационным возбуждением. На мой взгляд, А.С. Панев получил практически исчерпывающее решение задачи, положенной в основу диссертационного исследования. Все выносимые на защиту результаты представляются новыми, их достоверность гарантируется доказательствами соответствующих математических утверждений о свойствах решений дифференциального уравнения, описывающего динамическое поведение рассматриваемой системы, в сочетании с численными расчетами. Диссертация демонстрирует высокую квалификацию ее автора в области теоретической механики и дифференциальных уравнений. Полученные А.С. Паневым результаты вносят заметный вклад в теорию локомоционных систем и роботов с вибрационным возбуждением движения. С диссертацией А.С. Панева целесообразно ознакомиться научным работникам и инженерам, занимающимся проблемами вибрационного перемещения тел, а также созданием и исследованием локомоционных систем (мобильных роботов) вибрационного принципа действия, перемещающихся в сопротивляющихся средах без внешних движителей. Полученные диссертантом результаты могут быть использованы в научно-исследовательских институтах и вузах, в которых ведутся подобные исследования, в частности в Московском авиационном институте, Московском физико-техническом институте, Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Юго-Западном государственном университете, а также в научно-исследовательских отделах и конструкторских бюро предприятий, проектирующих мобильные роботы.

По результатам диссертационного исследования опубликованы три статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ для соискателей ученых степеней по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика, и три статьи в сборниках трудов международных научных конференций; одна из статей опубликована диссертантом в журнале из списка ВАК без соавторов. Кроме того, эти результаты неоднократно докладывались на семинарах и конференциях по теоретической и прикладной механике и робототехнике и в достаточной мере апробированы научной общественностью.

Автореферат диссертации правильно отражает ее содержание.

Существенных замечаний по научному содержанию диссертации у меня нет. Есть небольшие замечания по стилю изложения и обоснованию некоторых положений работы и, кроме того, в тексте встречаются опечатки и грамматические погрешности. Часть этих замечаний приводится ниже.

1. В формуле (1.13) между первым и вторым слагаемыми в левой части, по видимому, должен быть знак (\mp), а не ($-$).
2. В соотношениях (1.21), а также в числителе второго соотношения (1.22). тангенс должен быть взят в первой степени, а не во второй.
3. Непонятно, зачем приведено **Условие А** на стр. 35. По-моему, оно нигде не используется в дальнейшем.
4. По-моему, в формулировке **Теоремы 1** на стр. 36 имеются лишние слова. В первом предложении достаточно написать: *Пусть в области G правая часть*

уравнения (2.1) удовлетворяет условию В. Остальные предположения, перечисленные в этом предложении в тексте диссертации, входят в определение Условия В.

5. Излишне сложно доказывается монотонность последовательности $u(t + 2\pi n)$ для решений уравнения (1.15). Это свойство справедливо для любого дифференциального уравнения первого порядка с правой частью, 2π - периодической по фазовой переменной, для которого есть теорема существования и единственности, а не только для уравнения (1.15). Оно вытекает из того, что функция $u(t + 2\pi)$ есть решение этого уравнения, если $u(t)$ – решение, непрерывности решения и его единственности при заданных начальных условиях. Для доказательства этого свойства не нужно сравнивать два решения $u^{(1)}(t)$ и $u^{(2)}(t)$.

6. На стр. 36 в формулировке Условия В вместо $f(t, x)$ должно быть $F(t, x)$.

7. В строке 2 сверху на стр. 41 вместо «обратиться» должно быть «обратится». В строке 9 снизу на стр. 44 вместо «Тоже самое» должно быть «То же самое».

Перечисленные замечания носят технический характер и не снижают высокой оценки диссертации как научно-квалификационной работы.

Считаю, что диссертация «Исследование движения тела по горизонтальной плоскости под влиянием перемещения внутренней массы» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК Российской Федерации к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика, а ее автор, Александр Сергеевич Панев, безусловно, заслуживает присуждения ему искомой степени.

Официальный оппонент
главный научный сотрудник ИПМех РАН
доктор физико-математических наук
член-корреспондент РАН

Телефон: +7-(495)-434-35-01, e-mail: bolotnik@ipmnet.ru

Н.Н. Болотник

Подпись Н.Н. Болотника заверяю
И.О. Ученого секретаря ИПМех РАН
кандидат физико-математических наук



М.А. Котов