

ДОКЛАДЫ ЛАУРЕАТОВ БОЛЬШОЙ ЗОЛОТОЙ МЕДАЛИ ИМЕНИ  
М.В. ЛОМОНОСОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК 2023 ГОДА

АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЕ В ТЕХНИКЕ

ДОКЛАД ЛАУРЕАТА БОЛЬШОЙ ЗОЛОТОЙ МЕДАЛИ ИМЕНИ  
М.В. ЛОМОНОСОВА РАН 2023 ГОДА

© 2024 г. Д.М. Климов<sup>а,\*</sup>

<sup>а</sup>Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

\*E-mail: klimov@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 27.09.2024 г.

После доработки 10.10.2024 г.

Принята к публикации 01.11.2024 г.

Доклад, прозвучавший на Общем собрании членов РАН 28 мая 2024 г., посвящён большому кругу задач механики, тесно связанных с созданием инженерных конструкций. Автор изложил проблемы механики точных гироскопических систем, результаты построения новой, удовлетворяющей строгому анализу модели сил сухого трения. С использованием этой модели удаётся дать адекватное объяснение явлению шимми. Определённое внимание уделено развитию теории течения неньютоновских жидкостей (бингамовских жидкостей) и теории георыхления, а также теории волнового твердотельного гироскопа и новому явлению в механике – процессулирующим стоячим волнам.

*Ключевые слова:* самолёт, гироскоп, шимми, конструкция, бингамовская среда, нефть, волна, квадратура.

DOI: 10.31857/S0869587324120027, EDN: RIXPGT

Современная механика включает в себя, помимо традиционных направлений, исследования, связанные с физикой, химией, математикой, биологией, управлением сложными системами и робототехникой. Она также занимается решением конкретных технических проблем, связанных с инженерными разработками. Эта идеология была заложена в Институте проблем механики АН СССР в момент его создания, когда им руководил академик А.Ю. Ишлинский.

По окончании мехмата МГУ в 1958 г. я работал в Научно-исследовательском экспериментальном институте парашютно-десантного снаряжения

руководителем отдела, который выполнял исследования по безопасной доставке грузов различного назначения. В 1961 г. я перешёл в Научно-исследовательский институт гироскопической стабилизации (НИИ-944) Министерства судостроительной промышленности СССР (с 1965 г. – Научно-исследовательский институт прикладной механики Министерства общего машиностроения СССР), в котором я проработал довольно длительный срок, порядка 10 лет. Мои исследования были связаны с системами управления различными подвижными объектами (корабли, самолёты, ракеты). Я выполнял теоретические и экспериментальные исследования, необходимые для инженерных разработок. Проверка полученных результатов при моём участии обычно выполнялась на 95-й площадке Байконура.

Мои ранние исследования были связаны с гироскопами. Гироскоп – это прибор, который измеряет угловую скорость объекта. Если акселерометр измеряет, простыми словами, линейное ускорение объекта, то гироскоп – его угловую скорость. В настоящее время существует очень большое количество различных видов гироскопов, думаю, больше сотни. Для чего применяются гироскопы? Земля вращается с угловой скоростью 15 угловых минут в минуту. Первые гироскопы, которые могли изме-



КЛИМОВ Дмитрий Михайлович – академик РАН, председатель Объединённого научного совета РАН по механике.

рять угловую скорость объекта, работали на уровне двух-трёх угловых минут в минуту. С течением времени точность повышалась, достигнув сначала одной сотой угловой скорости в минуту, а затем одной тысячной. Сейчас говорят об одной десяти тысячной угловой скорости, но я отношусь к этой цифре с некоторым недоверием.

Если система управления корабля или самолёта имеет гироскопы и акселерометры, то она обеспечивает точную автономную информацию о местоположении объекта без использования внешней информации. Конечно, соответствующую информацию обеспечивают и системы GPS или ГЛОНАСС. Но в показаниях этих систем можно вмешаться, в то время как упомянутая автономная информация не подвержена вмешательству извне.

Создание гироскопических приборов – это сложная техническая задача, требующая усилий больших коллективов инженеров и научных сотрудников. На первом этапе этим занимались отдельные страны, такие как США, Германия, Франция, СССР. Другие страны предпочитали покупать готовые приборы. Я, пользуясь возможностью, хотел бы упомянуть людей, сыгравших огромную роль в решении этой задачи в нашей стране. Это А.Н. Крылов, Б.В. Булгаков, В.И. Кузнецов, Н.А. Пилюгин, А.Ю. Ишлинский, Д.С. Пельпор.

А.Н. Крылов – академик Петербургской АН и академик АН СССР, Герой Социалистического Труда, лауреат Сталинской премии. Его работы были посвящены девиации магнитного компаса, теории гироскопических компасов, теории качки корабля. Б.В. Булгаков – член-корреспондент АН СССР, заведующий кафедрой прикладной механики МГУ, которую он организовал в 1941 г. Свои работы он посвятил теории колебаний, прикладной теории гироскопов, теории регулирования. В.И. Кузнецов – академик АН СССР, дважды Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской премии, директор Института прикладной механики, в котором создавались гироскопические приборы для ракет. Н.А. Пилюгин – академик АН СССР, дважды Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской премии, главный конструктор Российского научно-исследовательского института космического приборостроения, конструктор систем управления ракетно-космическими комплексами. А.Ю. Ишлинский – академик АН УССР и АН СССР, Герой Социалистического Труда, почётный президент Российской инженерной академии, директор Института проблем механики АН СССР/РАН. Он был специалистом в области механики твёрдого тела, систем управления ракетами и гироскопов. Д.С. Пельпор – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой МВТУ им. Н.Э. Баумана, Лауреат Государственной премии СССР. Область его научных интересов – гироскопические приборы и системы управления летательных аппаратов.



Алексей Николаевич Крылов (1863–1945)



Борис Владимирович Булгаков (1900–1952)

Во время моей работы в Институте прикладной механики в системах управления часто использовался гироскоп в кардановом подвесе (рис. 1). Для создания теории гироскопа в карданном подвесе я использовал тот факт, что ось ротора такого гироскопа медленно изменяет своё направление в инерциальном пространстве [1]. Поэтому она может быть принята за одну из осей системы координат, что приводит к упрощению системы дифферен-



Виктор Иванович Кузнецов (1913–1991)



Александр Юльевич Ишлинский (1913–2003)



Николай Алексеевич Пилюгин (1908–1982)



Дмитрий Сергеевич Пельпор (1917–1996)

циальных уравнений гироскопа и позволяет полностью её исследовать. Построенная теория была подтверждена экспериментально. Впоследствии указанный способ построения системы координат использовался другими авторами в задачах динамики твёрдых тел.

Хотелось бы обратить внимание на интересное явление механики, связанное с движением маятника Шулера. Представим себе, что на корабле подвешен маятник с двумя степенями свободы. Если корабль будет двигаться, то маятник не будет показывать вертикаль, он отклонится от неё. А вот если он будет иметь период собственных колебаний 84.4 минуты (маятник Шулера), что соответствует состоянию покоя (корабль как бы не движется), то маятник всё время будет показывать вертикаль. Маятник был создан в 1970 г. в виде сложной кон-



Рис. 1. Модель гироскопа в кардановом подвесе

струкции, содержащей гироскопические элементы, и использовался в системе управления на одном из кораблей АН СССР. Мне удалось доказать теорему и сформулировать условия, при которых сложная механическая система является маятником Шулера [2].

Следующая проблема, которой я занимался, это теория шимми. Шимми – это явление вибрации колёс самолёта (рис. 2). Если вы посмотрите на детскую коляску, то увидите, что её колёса иногда болтаются. Это и есть шимми. Для самолётов это крайне опасное явление, поскольку вибрация может привести к катастрофе. Общепринятый подход – рассматривать в качестве основной причины шимми деформацию пневматика. Первые отечественные исследования в этой области относятся к 1944 г. и принадлежат Мстиславу Всеволодовичу Келдышу. При развитии его подхода для объяснения явления шимми использовались современные представления о силах сухого трения [3]. Такой подход позволил построить реальную картину развития явления шимми. В настоящее время он используется инженерами при испытаниях самолётов при вводе их в эксплуатацию.

Ряд моих работ был связан с механикой больших космических конструкций, создание которых сопряжено с решением некоторых технических и механических проблем, уникальность которых обусловлена сочетанием противоречивых требова-

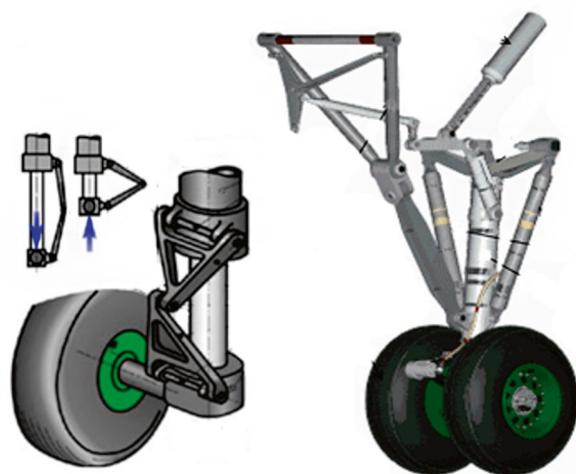


Рис. 2. Шасси самолёта

ний – увеличения геометрических размеров конструкций и обеспечения достаточной жёсткости при весьма ограниченной массе силового каркаса. Для преодоления этих трудностей и надёжной эксплуатации больших космических систем необходим подробный анализ условий функционирования объекта, внешних и внутренних силовых факторов и воздействий, температурного режима, тщательный подбор конструкционных материалов. Громадное значение приобретают методы идентификации упруго-массовых характеристик конструкции и методы оптимизационного моделирования, предназначенные для построения адекватных математических моделей, используемых в вычислительном эксперименте [4].

Помимо этого, мои исследования были связаны с теорией движения бингамовских сред. Они представляют собой вязкопластический материал, который ведёт себя как твёрдое тело при низких напряжениях, но течёт как вязкая жидкость при высоком напряжении. В институте, который я возглавлял, по этому направлению велось большое количество научных исследований [5]. Была написана теория бингамовских сред и создан прибор, который измеряет влияние вибрации и давления мягкой оболочки по специальному закону на бингамовскую среду. В результате удалось спроектировать промышленную установку по созданию материалов с новыми свойствами.

Мои научные интересы были связаны с развитием идей академика С.А. Христиановича, который длительное время работал (1972–1988) в Институте проблем механики АН СССР. Его предложения были связаны с новыми методами добычи нефти и газа, в частности методом георыхления. Если обычные способы добычи нефти предполагают накачку воздуха в скважину (я сильно упрощаю изложение), в результате которой образуется система трещин, через которую нефть поступает на поверхность земли, то С.А. Христианович предложил, наоборот, от-

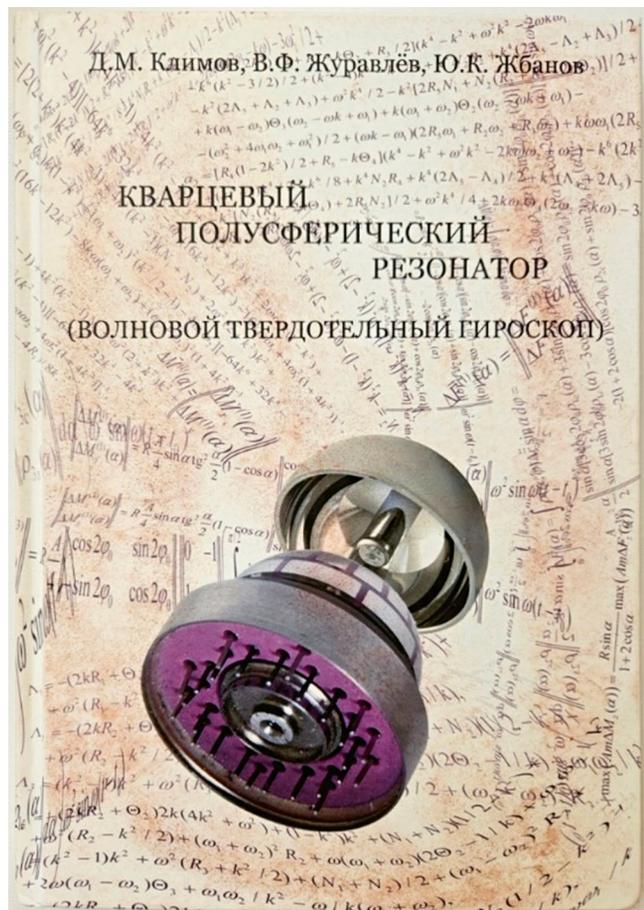


Рис. 3. Обложка книги Д.М. Климова, В.Ф. Журавлёва, Ю.К. Жбанова “Кварцевый полусферический резонатор (волновой твердотельный гироскоп)”

качивать воздух из скважины. В этом случае горное давление создаёт систему трещин, через которую поступает нефть. Но существует опасность того, что если откачать слишком много воздуха, скважина схлопнется. В ИПМ была разработана теория и создана специальная установка по испытанию образцов породы (кернов), позволяющая давать обоснованные рекомендации [6].

Большой цикл моих работ связан с теорией волнового твердотельного гироскопа. Эта теория изложена в написанной в соавторстве с академиком В.Ф. Журавлёвым и доктором физико-математических наук Ю.К. Жбановым книге “Кварцевый полусферический резонатор (волновой твердотельный гироскоп)” [7].

В чём смысл твердотельного гироскопа? Чувствительный элемент имеет вид рюмки. В краю рюмки специально возбуждаются колебания (волны). Когда гироскоп вращается, волны начинают двигаться, и по их движению можно определить движение объекта, на котором установлен гироскоп. Преимущество такого гироскопа заключается в том, что он не реагирует на многие внешние возмущения. Сейчас созданы

различные гироскопы на других принципах, но они чувствительны к внешним возмущениям. А этот гироскоп может работать в любых условиях, что крайне важно, имея в виду, что подобные приборы эксплуатируются не в тепличных лабораторных условиях, а на подвижных основаниях, и подвергаются разнообразным внешним воздействиям.

Вернёмся к волновому твердотельному гироскопу. Мне хотелось бы показать одно уравнение. Если мысленно отрезать верхнюю часть рюмки, то для неё можно вывести уравнение движения:

$$\frac{\partial^4}{\partial \tau^2 \partial \varphi^2} w(\varphi, \tau) \left[ \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} w(\varphi, \tau) + 4\omega(\tau) \left( \frac{\partial^2}{\partial \tau \partial \varphi} w(\varphi, \tau) \right) + 2 \left( \frac{d}{d\tau} \omega(\tau) \right) \left( \frac{\partial}{\partial \varphi} w(\varphi, \tau) \right) \right] + \frac{\partial^6}{\partial \varphi^6} w(\varphi, \tau) + 2 \left[ \frac{\partial^4}{\partial \varphi^4} w(\varphi, \tau) \right] + \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} w(\varphi, \tau) = 0. \tag{1}$$

Здесь  $w$  – это перемещение элемента края рюмки по радиусу;  $\tau$  – время;  $\varphi$  характеризует угол положения элемента на рюмке. Это линейное уравнение в частных производных с переменными коэффициентами. Угловая скорость  $\omega$ , которая входит в уравнение, является произвольной функцией времени. Именно её нам нужно найти при решении. Если искать решение в виде

$$w(\varphi, \tau) = r(\tau) \sin \left( 2\varphi + \kappa \int \psi(\tau) d\tau \right), \tag{2}$$

то получим простой ответ

$$\kappa = \frac{4}{5} \quad \psi(\tau) = \omega(\tau).$$

Таким образом установлен новый удивительный факт в механике – о существовании прецессирующих стоячих волн. Явление стоячей волны хорошо известно, её частицы движутся вверх-вниз, не перемещаясь вправо или влево. А прецессирующая стоячая волна движется, и нужно определить это движение. При этом, если искать решение в виде (2), то оказывается, что квадратура равна нулю.

Я должен объяснить, какой смысл имеет в данном случае слово квадратура. Применяемое мною понятие квадратуры я поясню простым наглядным примером, без математики. Представьте себе, что мы на вращающейся Земле подвесим маятник с двумя степенями свободы. Его можно толкнуть так, что он будет качаться только в одной плоскости. А можно толкнуть по-другому, и тогда конец маятника будет описывать эллипс. Площадь этого эллипса – и есть квадратура.

Для прецессирующей стоячей волны коэффициент  $\kappa$  равен  $4/5$ ,  $\psi(\tau) = \omega(\tau)$ , а квадратура равна

нулю. Отсюда ясно, как нужно управлять гироскопом. В системе управления нужно предусмотреть устройства, которые квадратуру подавляют и сводят к нулю. Если это сделать, то мы получим гироскоп, который может работать с большой точностью. Удивителен тот факт, что коэффициент  $k = 4/5$  не зависит от материала, из которого изготовлен гироскоп.

В настоящее время волновой твердотельный гироскоп вызывает большой интерес не только в нашей стране. Он успешно работает при наличии внешних возмущений, причём размеры его конструкции можно уменьшать, поэтому он применяется в системах управления различных объектов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Климов Д.М.* Исследование уходов астатического гироскопа в кардановом подвесе на качающемся основании // Известия АН СССР. Механика и машиностроение. 1963. № 5. С. 11–16.  
*Klimov D.M.* A study of the care of an astatic gyroscope in a Cardan suspension on a swinging base // Izvestiya AN SSSR. Mechanics and mechanical engineering. 1963, no. 5, pp. 11–16. (In Russ.)
2. *Климов Д.М.* Об условиях невозмущаемости гироскопической рамы // Прикладная математика и механика. 1964. Т. 28. Вып. 3. С. 511–513.  
*Klimov D.M.* On the conditions of non-perturbation of a gyroscopic frame // J. Appl. Math. Mech. 1964, vol. 28, no. 3, pp. 626–629. [https://doi.org/10.1016/0021-8928\(64\)90104-2](https://doi.org/10.1016/0021-8928(64)90104-2)
3. *Журавлёв В.Ф., Климов Д.М.* О механизме явления шимми // Доклады АН. 2009. Т. 428. № 6. С. 761–764.  
*Zhuravlev V.F., Klimov D.M.* The causes of the shimmy phenomenon // Doklady RAS. Physics. 2009, vol. 54, no. 10, pp. 475–478. <https://doi.org/10.1134/S1028335809100097> (In Russ.)
4. *Банничук Н.В., Карпов И.И., Климов Д.М. и др.* Механика больших космических конструкций. М.: Факториал, 1997.  
*Banichuk N.V., Karpov I.I., Klimov D.M. et al.* Mechanics of large space structures. M.: Factorial, 1997. (In Russ.)
5. *Гноевой А.В., Климов Д.М., Чесноков В.М.* Основы теории течений бингамовских сред. М.: Физматлит, 2004.  
*Gnoevoy A.V., Klimov D.M., Chesnokov V.M.* Fundamentals of the theory of flows of Bingham media. M.: Fizmatlit, 2004. (In Russ.)
6. *Карев В.И., Климов Д.М., Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б.* О разрушении осадочных горных пород в условиях сложного трёхосного напряжённого состояния // Известия РАН. Механика твёрдого тела. 2016. № 5. С. 15–21.  
*Karev V.I., Klimov D.M., Kovalenko Yu.F., Ustinov K.B.* Fracture of Sedimentary Rocks under a Complex Triaxial Stress State // Mech. Solids. 2016, vol. 51 (5), pp. 522–526. <http://doi.org/10.3103/S0025654416050022> (In Russ.)
7. *Климов Д.М., Журавлёв В.Ф., Жбанов Ю.К.* Кварцевый полусферический резонатор (волновой твердотельный гироскоп). М.: Изд-во Ким Л.А., 2017.  
*Klimov D.M., Zhuravlev V.F., Zhanov Yu.K.* Quartz hemispherical resonator (wave solid-state gyroscope). Moscow: Publishing house of Kim L.A., 2017. (In Russ.)

## ACTUAL PROBLEMS OF MECHANICS AND THEIR APPLICATION IN ENGINEERING

REPORT BY THE LAUREATE OF THE 2023 M.V. LOMONOSOV GRAND GOLD MEDAL OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

**D.M. Klimov<sup>a,\*</sup>**

<sup>a</sup>*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>\*</sup>*E-mail: klimov@ipmnet.ru*

The report, presented at the General Meeting of the Russian Academy of Sciences on May 28, 2024, is devoted to a wide range of problems in mechanics closely related to the creation of engineering structures. The author outlined the problems of mechanics of precise gyroscopic systems, the results of constructing a new model of dry friction forces that satisfies strict analysis. Using this model, it is possible to give an adequate explanation of the shimmy phenomenon. Particular attention is paid to the development of the theory of non-Newtonian fluid flow (Bingham fluids) and the theory of geo-loosening, as well as the theory of a wave solid-state gyroscope and a new phenomenon in mechanics – processive standing waves.

*Keywords:* aircraft, gyroscope, shimmy, structure, Bingham medium, oil, wave, quadrature.