

УДК 533.6.011.55

Влияние приведенной частоты на кинематику самовозбуждающихся колебаний коническо-сферического тела при числе Маха $M = 1,75^*$

Е.А. Часовников

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

E-mail: chas@itam.nsc.ru

Проведены испытания конуса с задней полусферической частью в сверхзвуковой аэродинамической трубе на установке свободных колебаний по углу тангажа при числе Маха $M = 1,75$ при нескольких значениях момента инерции тела относительно оси вращения. Во всех испытаниях после завершения переходного процесса зафиксированы незатухающие колебания конуса с амплитудой, зависящей от приведенной частоты. Выявлено, что зависимость амплитуды незатухающих колебаний от приведенной частоты имеет выраженный резонансный характер.

Ключевые слова: конус, момент инерции, самовозбуждающиеся колебания, амплитуда автоколебаний, приведенная частота колебаний.

Введение

Феномен потери аэродинамического демпфирования тангажа осесимметричных тел при малых сверх- и транзвуковых скоростях [1], которые широко применяются в качестве спускаемых космических летательных аппаратов, изучается в течение длительного времени. Исследования ограничиваются, как правило, небольшими амплитудами колебаний и позволяют решать задачи динамической устойчивости при малых возмущениях. Известно, что потеря демпфирования приводит к самовозбуждающимся колебаниям и впоследствии — к формированию незатухающих колебаний по углу тангажа (автоколебаний). Важно уметь прогнозировать это явление для решения практических задач. Численные методы, базирующиеся на решении уравнений сплошной среды [2], в настоящее время разработаны недостаточно. Поэтому эксперимент остается пока единственным инструментом, позволяющим решать рассматриваемую задачу. Однако существуют большие технические и принципиальные сложности для проведения этого метода исследования, в частности, большие погрешности измерений, сильное влияние поддерживающих

* Работа выполнена в рамках программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2021–2023 годы. Эксперименты проведены на базе ЦКП «Механика».

устройств, сложность визуализации картины обтекания и т.д. Вследствие этого даже при дозвуковых скоростях механизмы автоколебаний осесимметричных тел до сих пор изучены слабо [3].

В качестве объектов исследования нередко используются такие простые тела, как конусы [3–6]. В работах [5, 6] при испытаниях в аэродинамической трубе на установке свободных колебаний (рис. 1а) были обнаружены автоколебания острого кругового конуса с задней полусферической частью (коническо-сферического тела, везде далее — просто конуса) (см. рис. 1б) при числе Маха $M = 1,75$ и двух моментах инерции — $I_Z = 14,0 \cdot 10^{-3}$, $2,2 \cdot 10^{-3}$ кг·м². Было выявлено сильное уменьшение амплитуды автоколебаний при меньшем моменте инерции (при большей частоте колебаний). В настоящей работе представлены результаты более детального исследования по влиянию частоты колебаний на кинематику самовозбуждающихся колебаний конуса, рассмотренного ранее в работах [5, 6].

1. Экспериментальное оборудование, модели и условия испытаний

Экспериментальные исследования проводились в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-313 ИТПМ СО РАН [7] на установке свободных колебаний с поперечной державкой [5] (рис. 1а). Державка 3 вилок 2 устанавливалась в саблевидную подвеску α -механизма механических весов с углом крена 90°. После выхода трубы на рабочий режим и освобождения модели 1 с помощью арретира 7 модель совершала свободные колебания по углу тангажа относительно поперечной оси 5, которые регистрировались с помощью цифрового датчика угла 4. Частота опроса составляла 1000 Гц.

При испытаниях использовались два геометрически идентичных конуса (рис. 1б), что и в работах [5, 6], исходно имеющие моменты инерции $I_Z = 2,2 \cdot 10^{-3}$ кг·м² (далее — легкий конус) и $I_Z = 14,0 \cdot 10^{-3}$ кг·м² (далее — тяжелый конус). Изменение моментов инерции конусов осуществлялось посредством установки внутри последних дополнительных грузов. В легком конусе таких грузов размещалось два, в тяжелом — один. Были проведены также испытания тяжелого конуса с небольшим закруглением его носовой части по сфере (см. таблицу). Радиус закругления составлял $r = 2$ мм ($\bar{r} = r/D = 0,0166$, D — диаметр миделевого сечения). Ось вращения конусов располагалась на оси симметрии на расстоянии $x_{cg} = 91,2$ мм от носика острого конуса ($\bar{x}_{cg} = x_{cg}/l = 0,55$, l — длина конической части модели). Моменты инерции конусов относительно оси вращения определялись экспериментально.

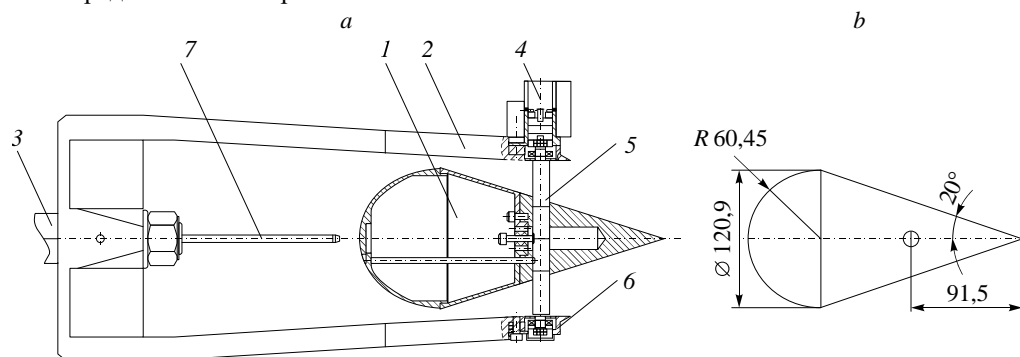


Рис. 1. Схемы установки свободных колебаний (а) и модели (б).

а: 1 — модель, 2 — вилка, 3 — державка, 4 — датчик угла, 5 — ось, 6 — подшипники качения, 7 — арретир;
 б: круглым маркером на оси симметрии отмечено положение оси вращения; размеры приведены в мм.

Таблица

Параметры эксперимента

№ протокола	M	$Re \cdot 10^{-6}$	α_0 , град	$\bar{\omega}$	$\Theta_{авт}$, град	Примечание
$I_z = 2,20 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$						
4326	1,78	4,15	10,8	0,0556	1,8	
$I_z = 3,15 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$						
4632	1,78	4,5	11,1	0,0456	2,3	
4631	1,77	4,0	11,0	0,0439	2,2	
4630	1,77	3,0	11,3	0,0371	3,0	
$I_z = 6,59 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$						
4475	1,79	3,96	-1,1	0,0290	7,3	
$I_z = 14 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$						
4126	1,80	3,98	11,6	0,0207	10,0	
4157	1,80	3,98	4,7	0,0199	9,5	
4159	1,79	3,96	-1,2	0,0198	17,3	
4130	1,80	3,85	-0,2	0,0197	20,7	
4161	1,79	3,95	33,8	0,0196	13,2	
4158	1,79	3,95	10,5	0,0195	10,4	
4160	1,79	3,37	-1,1	0,0184	10,0	
4329	1,79	3,98	-1,2	0,0199	12,2	Носик закруглен
4328	1,79	3,98	5,9	0,0199	12,5	Носик закруглен
4327	1,79	4,00	10,5	0,0199	11,0	Носик закруглен
$I_z = 23,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$						
4627	1,78	4,14	11,0	0,0160	5,4	Носик закруглен
4629	1,78	4,12	32,3	0,0156	4,9	Носик закруглен
4626	1,78	3,13	11,1	0,0140	1,5	Носик закруглен
4625	1,78	3,10	3,2	0,0136	0,5	Носик закруглен

В таблице приведены условия испытаний, параметры подбоя и экспериментальные характеристики колебаний конусов для всех реализаций, включая полученные в работах [5, 6]. Обозначения параметров в таблице следующие: № протокола — четырехзначный номер протокола испытаний, Re — число Рейнольдса, рассчитанное по характерной длине конуса, α_0 — начальный угол атаки (при фиксации конуса арретиром), $\bar{\omega} = \omega l / V$ — приведенная частота колебаний, $\omega = 2\pi f$ — круговая частота колебаний, f — частота колебаний, l — характерная длина модели, V — скорость потока, $\Theta_{авт}$ — амплитуда автоколебаний, «носик закруглен» — тяжелый конус с закругленной носовой частью.

Испытания проводились при номинальном числе Маха невозмущенного потока $M = 1,75$. Для изменения частоты колебаний конуса в ряде случаев менялся режим в аэродинамической трубе посредством применения эжекторов или изменения полного давления в форкамере. Это приводило к изменению скоростного напора в рабочей части трубы и, соответственно, частоты колебаний конуса. Следует отметить, что одновременно несколько изменялось и число Рейнольдса. Определение параметров потока в трубе проводилось по стандартной методике, применяемой при проведении экспериментов в Т-313.

В качестве характерной длины $l = 0,166$ м для расчета всех параметров и характеристик была принята длина конической части модели (рис. 1b), а в качестве характерной площади $S = 0,01147 \text{ м}^2$ — площадь миделевого сечения конуса.

2. Обсуждение результатов

Испытания показали, что во всех случаях формируются автоколебания конуса. На рис. 2 приведены исходные экспериментальные данные в виде зависимости угла тангажа от времени для некоторых реализаций. Нетрудно заметить, что при $I_z = 6,59 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ и $I_z = 14 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ автоколебания возникают и при очень малых начальных углах атаки (рис. 2с, 2д), что позволяет классифицировать их как автоколебания с мягким возбуждением. По всей видимости, при других моментах инерции также имеют место автоколебания с мягким возбуждением. Также видно, что амплитуда автоколебаний существенно зависит от момента инерции (частоты колебаний). Результаты испытаний показывают, что при моментах инерции $I_z = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ и $I_z = 3,15 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ автоколебания носят нерегулярный характер (амплитуда автоколебаний сильно меняется по времени) (рис. 2а, 2б).

Ниже дано краткое описание методики определения амплитуды и приведенной частоты автоколебаний. Вначале находились максимальные θ_{\max} и минимальные θ_{\min} значения угла тангажа на участке автоколебаний (рис. 3) [8]. Затем проводилось осреднение θ_{\max} и, соответственно, θ_{\min} . Амплитуда автоколебаний вычислялась по формуле $\Theta_{\text{авт}} = [(\theta_{\max})_{\text{sr}} - (\theta_{\min})_{\text{sr}}] / 2$, где $(\theta_{\max})_{\text{sr}}$ и $(\theta_{\min})_{\text{sr}}$ — средние значения соответствующих параметров. Для нерегулярных автоколебаний в качестве их амплитуды принималась максимальная амплитуда. Текущая круговая частота колебаний рассчитывалась по формуле $(\omega_{\theta_{\max}})_i = 2\pi / [(t_{\max})_{i+1} - (t_{\max})_i]$, где $(t_{\max})_{i+1}$ и $(t_{\max})_i$ — моменты времени, соответ-

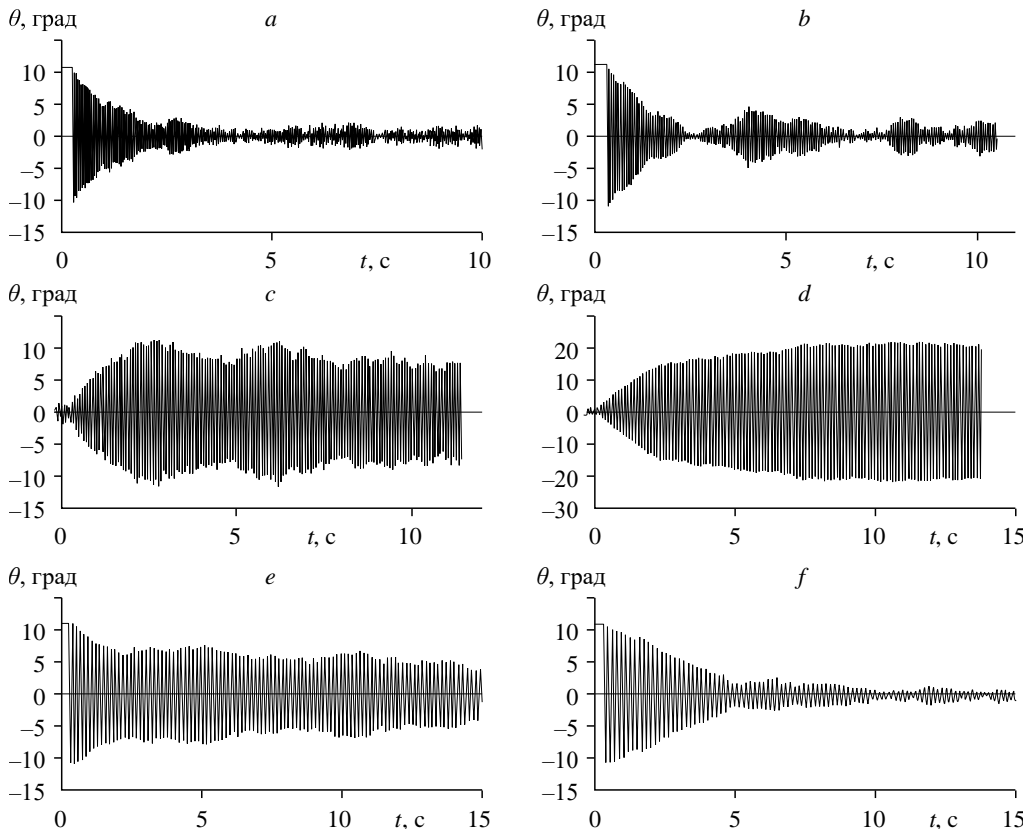


Рис. 2. Зависимость угла тангажа от времени.

а – f: соответственно № протоколов 4326, 4630, 4475, 4130, 4627, 4626.

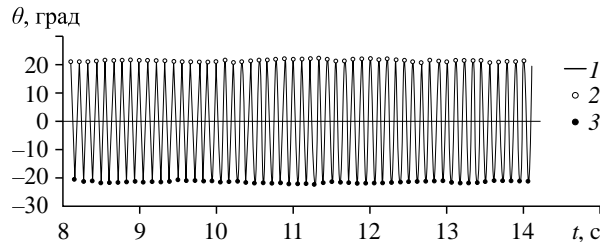


Рис. 3. Зависимость угла тангажа от времени (1), максимальные (2) и минимальные (3) значения угла тангажа.

ствующие двум последовательным значениям: $(\theta_{\max})_{i+1}$ и $(\theta_{\max})_i$. Далее находилась средняя круговая частота $(\omega_{\theta_{\max}})_{sr}$. Аналогичная процедура проводилась для θ_{\min} . Среднее значение $\omega = [(\omega_{\theta_{\max}})_{sr} + (\omega_{\theta_{\min}})_{sr}]/2$ принималось за частоту автоколебаний. Приведенная частота автоколебаний определялась по формуле $\bar{\omega} = \omega l/V$.

На рис. 4 представлена зависимость амплитуды автоколебаний конуса от приведенной частоты колебаний для всех реализаций. Видно, что эта зависимость имеет выраженный резонансный характер. Максимальные амплитуды реализуются вблизи $\bar{\omega} \approx 0,02$. Левая ветвь зависимости существенно круче правой. Максимальная чувствительность амплитуды к изменению приведенной частоты наблюдается вблизи резонанса (рис. 5). Здесь следует отметить следующее. Так как в этом случае при изменении приведенной частоты менялось и число Рейнольдса, то нельзя быть полностью уверенным в том, что полученный эффект обусловлен только изменением приведенной частоты. Не исключено, что это следствие влияния приведенной частоты и числа Рейнольдса. Кроме того, в испытаниях менялся и начальный угол атаки. Так, при $\alpha_0 = -0,2$ град (№ протокола 4130) амплитуда автоколебаний была наибольшей. С увеличением начального угла происходило уменьшение амплитуды автоколебаний (№ протоколов 4159, 4126). Такое поведение амплитуды автоколебаний на резонансном пике может быть истолковано как зависимость амплитуды автоколебаний от начального угла атаки [5]. Однако это представляется маловероятным и не может найти разумного обоснования.

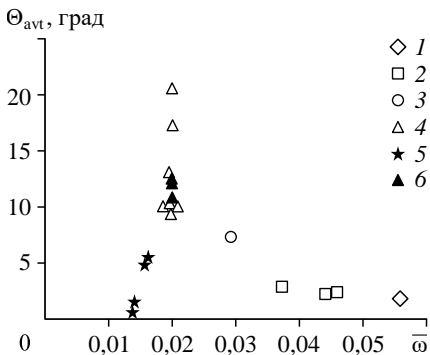


Рис. 4. Зависимость амплитуды автоколебаний от приведенной частоты.

1–4 — соответственно $I_z = 2,2 \cdot 10^{-3}$, $3,15 \cdot 10^{-3}$, $6,59 \cdot 10^{-3}$, $14 \cdot 10^{-3}$ кг·м²;
5–6 — соответственно $I_z = 23,3 \cdot 10^{-3}$, $14 \cdot 10^{-3}$ кг·м² (носик конуса закруглен).

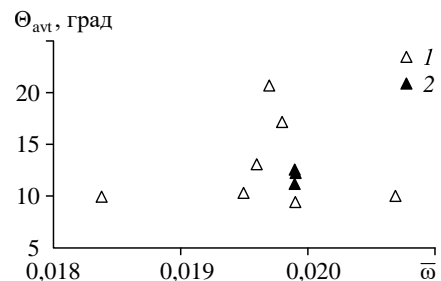


Рис. 5. Зависимость амплитуды автоколебаний от приведенной частоты в области максимальных амплитуд.

1 — $I_z = 14 \cdot 10^{-3}$ кг·м²;
2 — $I_z = 14 \cdot 10^{-3}$ кг·м² (носик конуса закруглен).

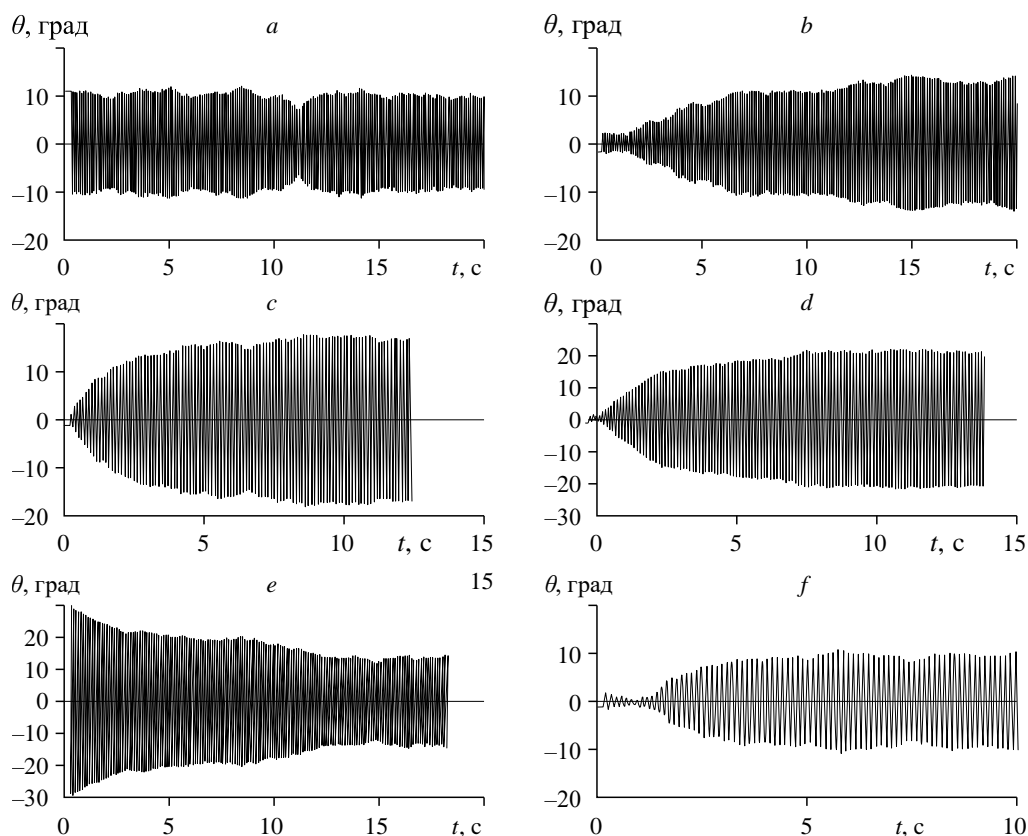


Рис. 6. Зависимость угла тангажа от времени в окрестности максимальных амплитуд автоколебаний.
a–f: соответственно № протоколов 4126, 4329, 4159, 4130, 4161, 4160.

Наиболее логичным все же было бы предполагать зависимость амплитуд автоколебаний от приведенной частоты. Следует отметить, что небольшое изменение приведенной частоты вблизи резонанса при испытаниях тяжелого конуса зачастую происходило непреднамеренно, т.к. полное давление в форкамере строго не контролировалось.

Данные, представленные на рис. 6, иллюстрируют кинематику самовозбуждающихся колебаний тяжелого конуса вблизи резонансной частоты.

Заключение

Получены зависимости угла тангажа от времени для свободных колебаний конуса с полусферической задней частью при числе Маха $M = 1,75$ в широком диапазоне изменения приведенной частоты колебаний и начальных углов атаки. Обнаружены следующие закономерности.

Во всех испытаниях после переходных процессов формируются автоколебания конуса. При больших приведенных частотах автоколебания становятся нерегулярными. Начальный угол атаки не влияет на амплитуду автоколебаний. Зависимость амплитуды автоколебаний от приведенной частоты носит резонансный характер. Максимальные амплитуды зафиксированы при приведенных частотах $\bar{\omega} \approx 0,02$. В этой же области наблюдается наибольшая чувствительность амплитуды к изменению приведенной частоты или (и) числа Рейнольдса.

Автор выражает благодарность Н.П. Адамову и М.В. Чистякову, оказавшим помощь в подготовке и проведении экспериментов.

Список литературы

1. **Kazemba C.D., Braun R.D., Clark L.G., Schoenenberger M.** Survey of blunt body supersonic dynamic stability // J. Spacecraft and Rockets. 2017. Vol. 54, No 1. P. 109–127.
2. **Murman S.M.** Dynamic viscous simulations of atmospheric-entry capsules // AIAA 2008-6911. 2008. P. 1–21.
3. **Федяевский К.К., Блюмина Л.Х.** Гидродинамика отрывного обтекания. М.: Машиностроение, 1977. 120 с.
4. **Adcock J.B.** Some experimental relations between the static and dynamic stability characteristics of sting-mounted cones with bulbous bases // Transactions of the 3rd Technical Workshop on Dynamic Stability Problems. Paper 5. Vol. II, NASA Ames Research Center, Moffett Field, Calif., Nov. 1968. P. 37–44.
5. **Adamov N.P., Chasovnikov E.A.** Self-induced oscillations of a cone with a hemispherical rear part at low supersonic velocities // American Institute of Phys. Conf. Proceedings. 2018. Vol. 2027. P. 030150-1–030150-5.
6. **Мищенко Н.А., Часовников Е.А.** Исследование самовозбуждающихся колебаний по тангажу коническо-сферического тела при числе Маха $M = 1,75$ и двух моментах инерции // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 1. С. 43 – 52.
7. **Харитонов А.М.** Техника и методы аэрофизического эксперимента. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. 642 с.
8. **Адамов Н.П., Харитонов А.М., Часовников Е.А., Дядькин А.А., Крылов А.Н., Александров Э.Н.** Экспериментальные исследования аэродинамических характеристик модели возвращаемого аппарата на установке свободных колебаний при сверхзвуковых скоростях // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23, № 6. С. 825–834.

*Статья поступила в редакцию 9 января 2024 г.,
после доработки — 9 января 2024 г.,
принята к публикации 13 июня 2024 г.*