

ЩЕГЛОВ ГЕОРГИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПРЯМОГО ТРУБОПРОВОДА
С ПРОТЕКАЮЩЕЙ ЖИДКОСТЬЮ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ДВУХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ВОЗБУЖДЕНИЙ**

Специальность 05.13.16 - Применение вычислительной техники,
математического моделирования, и
математических методов в научных
исследованиях

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Москва 1999

Работа выполнена в Московском государственном техническом
университете имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель - доктор физико-математических наук,
профессор Челомей С.В.
Научный консультант - доктор технических наук,
профессор Тушев О.Н.
Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Агафонов С.А.
кандидат физико-математических наук
Шамолин М.В.
Ведущая организация - НПО Машиностроения

Защита диссертации состоится «16» ноября 1999 г. в 11³⁰ час. на
заседании диссертационного совета Д 053.15.12 при Московском
государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу
107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

... иться в библиотеке МГТУ имени Н.Э.

1999 г.

...ом экземпляре, заверенный печатью
107005, Москва, 2-я Бауманская ул.,
...енному секретарю диссе

1564655

Волко

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1564655

Щеглов Г.А. Динамическая

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

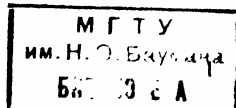
Диссертационная работа посвящена исследованию динамической устойчивости трубопровода с протекающей жидкостью под действием двух параметрических возбуждений.

Трубопроводы относятся к наиболее ответственным элементам конструкций в современной технике. Большой процент аварий в авиационной и космической технике, а также в других отраслях машиностроения происходит из-за неисправностей именно этих элементов. Причиной неисправностей чаще всего оказываются сильные резонансные поперечные колебания трубопроводов, возникающие от знакопеременных нагрузок, передаваемых трубе в результате пульсаций движущейся жидкости, работы механизмов подачи и колебаний конструкции летательных аппаратов.

Для исследования динамической устойчивости современных трубопроводов все чаще требуется применение уравнений, описывающих параметрические колебания упругих систем.

При расчете параметрических колебаний трубопроводов с протекающей жидкостью в настоящее время, как правило, ставятся и решаются раздельно две задачи, связанные с различными видами возбуждений параметрических колебаний: параметрические колебания трубопровода, вызываемые пульсациями потока протекающей жидкости, и параметрические колебания трубопровода, вызываемые переменной осевой нагрузкой на трубу. Решению этих задач посвящено большое число исследований. Следует отметить работы Н.М. Крылова и Н.Н. Боголюбова, В.Н. Челомея, С.В. Челомея, В.А. Светлицкого, Ю.А. Куликова, Е. Меттлера, В.В. Болотина, М.С. Натансона, Н.С. Кондрашева, М. Пайдусиса.

Однако, в современных технических системах, обладающих большой мощностью и малой массой, трубопроводы часто оказываются подвержены одновременному воздействию двух описанных выше параметрических возбуждений. Проведенный анализ литературы показывает, что данная, более общая задача в настоящее время изучена слабо.



Целью работы является изучение динамической устойчивости прямого трубопровода с протекающей жидкостью при одновременном воздействии на него двух независимых периодических параметрических возбуждений: переменной осевой силы и переменной скорости потока протекающей жидкости, частота которых сравнима с частотой собственных поперечных колебаний системы.

Основные задачи исследований.

1. Получение в наиболее общем виде системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику рассматриваемой упругой системы.
2. Исследование полученной системы линейных дифференциальных уравнений асимптотическими методами в первом приближении.
3. Определение всех возможных случаев наступления параметрического резонанса в системе. Исследование новых типов параметрических резонансов, присущих только системе с двумя параметрическими возбуждениями.
4. Получение приближенных аналитических зависимостей для определения областей динамической неустойчивости новых типов параметрических резонансов.
5. Получение в аналитическом виде условий существования областей динамической неустойчивости новых типов параметрических резонансов.
6. Получение дифференциальных уравнений, описывающих поведение амплитуды и фазы решений в окрестностях областей неустойчивости всех новых типов параметрических резонансов в первом приближении.
7. Экспериментальное подтверждение достоверности полученных аналитических зависимостей. Оценка точности приближенных формул.
8. Разработка программного обеспечения, позволяющего производить численные исследования и расчеты реальных конструкций по полученным теоретическим зависимостям.

Научная новизна работы заключается в получении более общей системы дифференциальных уравнений, описывающей поперечные колебания прямого трубопровода под действием двух периодических параметрических

возбуждений, определении с помощью асимптотических методов в первом приближении всех возможных резонансных случаев и исследовании новых типов параметрических резонансов, присущих только системе с двумя параметрическими возбуждениями.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Система линейных дифференциальных уравнений, описывающая поперечные колебания прямого трубопровода под действием двух параметрических возбуждений, являющаяся общим случаем для двух известных систем; описывающих параметрические колебания трубопроводов с пульсирующей жидкостью и параметрические колебания стержня, нагруженного переменной осевой силой.
2. В первом приближении установлены все возможные случаи наступления параметрического резонанса в системе. Показано, что действие на систему двух параметрических возбуждений приводит к резкому увеличению числа резонансов, возможных в системе.
3. Обнаружены и исследованы новые типы параметрических резонансов, присущие только системам с двумя параметрическими возбуждениями: аддитивные и особые резонансы. Выведены приближенные аналитические зависимости для определения областей динамической неустойчивости, условия существования областей динамической неустойчивости новых типов параметрических резонансов. Получены приближенные дифференциальные уравнения, описывающие поведение амплитуды и фазы решений в окрестностях областей неустойчивости аддитивных и особых резонансов.
4. Доказано, что аддитивные резонансы являются более общим случаем известных основных и комбинационных резонансов, возникающих в системе с одним параметрическим возбуждением. Найдено и доказано новое обобщенное «правило знаков» для аддитивных резонансов. Получено условие расширения области неустойчивости аддитивных резонансов при введении в систему демпфирования.

5. Обнаружен ряд особых свойств аддитивных и особых резонансов. Показано, что в аддитивном резонансе динамическая неустойчивость может быть устранена за счет взаимодействия двух параметрических возбуждений. Установлено, что в некоторых типах особых резонансов при увеличении амплитуды одного из возбуждений область динамической неустойчивости не расширяется, а, наоборот, сужается.
6. Полученные в работе теоретические результаты проверены при помощи численных экспериментов на ЭВМ.

Достоверность и обоснованность научных положений подтверждается сравнением результатов теоретических расчетов с результатами численных экспериментов, проведенных с использованием известных численных методов.

Проведенные эксперименты показывают, что применение аналитических зависимостей позволяет получать результаты с точностью, пригодной для любых практических приложений.

Практическая ценность работы состоит в том, что проведенные исследования позволили получить ряд новых важных результатов, позволяющих более полно и точно оценивать динамику реальных трубопроводов с протекающей жидкостью.

Полученные аналитические зависимости позволяют проводить как количественный, так и качественный анализ конструкций, что позволяет существенно сократить затраты машинного времени при проектировании.

Разработана программа РРКТ под операционную систему WINDOWS 95, позволяющая производить количественные и качественные исследования, а также практические расчеты динамической устойчивости реальных трубопроводов с двумя параметрическими возбуждениями.

Апробация работы и публикации: основные положения диссертационной работы были доложены на постоянно действующем научно-техническом семинаре кафедры М2 МГТУ им. Н.Э. Баумана (1997 г., 1998г.), постоянно действующем семинаре кафедры прикладной математики МГТУ им. Н.Э. Баумана (1998г.), студенческой НТК аэрокосмического факультета

МГТУ им. Н.Э. Баумана при НПО Машиностроения (г. Реутов, 1998). По теме диссертации опубликовано 2 статьи в академических журналах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 82 наименований, приложения и изложена на 178 страницах, включая 32 листа иллюстраций и 16 таблиц. Объем приложения 26 листов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проведен обзор литературы по теме исследований, сформулирована цель диссертационной работы, обоснована актуальность и практическая ценность работы, кратко описаны основные полученные результаты.

На основе анализа работ, посвященных изучению параметрических колебаний упругих систем, сделан вывод, что до настоящего времени подавляющее большинство исследователей рассматривает действие на систему только одного параметрического возбуждения. В работе показано, что более общая задача воздействия на механическую систему двух параметрических возбуждений изучена слабо и практически не описана в литературе.

Ставится задача исследования динамической устойчивости прямого трубопровода с протекающей жидкостью, находящегося под действием двух независимых моногармонических параметрических возбуждений, частоты которых имеют одинаковый порядок с собственными частотами поперечных колебаний системы.

Приводится обзор работ, посвященных исследованию динамики трубопроводов с жидкостью. Указывается, что особенностью данной упругой системы является наличие в ней двух взаимодействующих между собой подсистем: упругой трубы и потока жидкости в трубе. Наличие двух подсистем позволяет ввести в систему два независимых возбуждения (рис.1). В качестве первого параметрического возбуждения выбирается приложенная к трубе осевая сжимающая сила (Q), имеющая небольшую переменную

составляющую, изменяющуюся по гармоническому закону с частотой p . В качестве второго параметрического возбуждения выбирается пульсация скорости протекающей жидкости (v), имеющая гармонический закон изменения с частотой ξ .

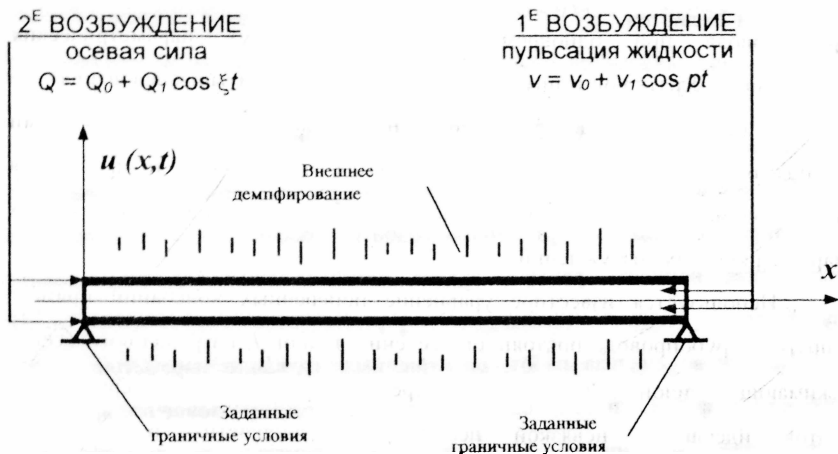


Рис. 1 Расчетная схема трубопровода, находящегося под действием двух параметрических возбуждений

Обосновывается актуальность и практическая ценность исследования динамической устойчивости трубопровода, нагруженного двумя параметрическим возбуждениями. Приводятся примеры конструкций реальных трубопроводов, в которых возможно возникновение двух параметрических возбуждений. В частности, рассматриваются трубопровод топливной системы летательного аппарата и системы «насос-трубопровод-клапан» промышленных предприятий.

Производится анализ работ, посвященных исследованию параметрических колебаний трубопроводов. Делается вывод, что при расчете параметрических колебаний решаются раздельно две задачи, связанные с каждым из возбуждений. В частности, указывается, что существуют известные работы по исследованию параметрических колебаний трубопроводов под действием только пульсирующего потока жидкости (М.С. Натанзон, Н.С. Кондрашев, М. Пайдусисс, С.В. Челомей,

В.А. Светлицкий, Ю.А. Куликов и др.) и работы по исследованию воздействия на стержень, которым является труба, переменной осевой силы (Н.М. Беляев, Н.М. Крылов и Н.Н. Боголюбов В.Н. Челомей, С.В. Челомей, Е. Меттлер, В.В. Болотин и др.).

Формулируется цель диссертационной работы: объединение двух задач в одну общую задачу - исследование динамической устойчивости трубопровода при одновременном действии двух параметрических возбуждений. Кратко описаны наиболее важные результаты исследования.

В первой главе выводятся основные уравнения, асимптотическими методами в первом приближении находятся их решения и проводится исследование динамической устойчивости трубопровода под действием двух параметрических возбуждений.

Используется известное уравнение поперечных колебаний прямого упругого трубопровода постоянного сечения длиной l , нагруженного осевой сжимающей силой $Q=Q_0+Q_1\cos \xi t$, через который протекает неразрывный поток идеальной невязкой несжимаемой жидкости со скоростью $v=v_0+v_1\cos pt$, (В.И. Феодосьев, В.А. Светлицкий, С.В. Челомей и др.):

$$EJ \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + k_1 J \frac{\partial^3 u}{\partial x^3 \partial t} + k_2 \frac{\partial u}{\partial t} + (Q + \rho v^2) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2\rho v \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + \rho \frac{\partial v}{\partial t} \frac{\partial u}{\partial x} + (\rho + m) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

где $u(x,t)$ - малые поперечные перемещения элемента стержня; EJ - постоянная по длине жесткость стержня при изгибе; ρ - погонная масса стержня; m - погонная масса жидкости; k_1 , k_2 - коэффициенты внутреннего и внешнего демпфирования.

Решение (1) находится в виде разложения по формам собственных колебаний

$$u(x,t) = \sum_{j=1}^{\infty} \varphi_j(t) Y_j(x) \quad (2)$$

где $Y_j(x)$ - нормальные функции, удовлетворяющие граничным условиям и условиям ортогональности.

С помощью метода нормальных координат уравнение (1) преобразуется в бесконечную систему дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами:

$$\begin{aligned} & \frac{d^2 \varphi_i}{dt^2} + \omega_i \delta_{ii} \frac{d\varphi_i}{dt} + \omega_i^2 \varphi_i + 2\omega_i \cos pt \sum_{j=1}^{\infty} \eta_{ij} \frac{d\varphi_j}{dt} + \\ & + 2\omega_i^2 \sum_{j=1}^{\infty} (\gamma_{ij} \cos pt - k_{ij}^* \sin pt + q_{ij} \cos 2pt + h_{ij} \cos \xi t) \varphi_j + \quad (i=1,2,\dots) \quad (3) \\ & + \sum_{j=1}^{\infty} (\omega_i^2 \beta_{ij} \varphi_j + \omega_i \mu_{ij} \frac{d\varphi_j}{dt}) = 0 \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \omega_i^2 &= \Omega_i^2 + (v_0^2 + \frac{1}{2} v_1^2 + \frac{Q_0}{\rho}) c_{ij}; \\ \delta_{ij} &= \left(\frac{k_{i1} \Omega_i^2}{E} + \frac{k_{i2}}{(\rho+m)} + 2v_0 b_{ij} \right) / \omega_i; \quad \beta_{ij} = \left(v_0^2 + \frac{1}{2} v_1^2 + \frac{Q_0}{\rho} \right) c_{ij} / \omega_i^2; \\ h_{ij} &= \frac{Q_1}{\rho} \frac{c_{ij}}{2\omega_i^2}; \quad \eta_{ij} = \frac{v_1 b_{ij}}{\omega_i}; \quad \gamma_{ij} = \frac{v_0 v_1 c_{ij}}{\omega_i^2}; \quad q_{ij} = \frac{v_1^2 c_{ij}}{4\omega_i^2}; \quad k_{ij}^* = \frac{p}{2\omega_i}; \quad \mu_{ij} = \frac{2v_0 b_{ij}}{\omega_i}; \\ \Omega_i^2 &= \frac{EJ \int_0^l Y_i^{IV} Y_i dx}{L}; \quad L = \int_0^l Y_i^2 dx; \quad b_{ij} = \frac{\rho}{\rho+m} \frac{\int_0^l Y_i^I Y_j dx}{L}; \quad c_{ij} = \frac{\rho}{\rho+m} \frac{\int_0^l Y_i^{II} Y_j dx}{L}. \end{aligned}$$

Показано, что полученная система (3) является общим случаем систем дифференциальных уравнений, используемых в настоящее время для исследования динамической устойчивости трубопровода с пульсирующей жидкостью и исследования динамической устойчивости стержня, нагруженного переменной осевой силой.

Асимптотическим методом Н.Н. Боголюбова в первом приближении проводится решение системы (3). При этом предполагается, что безразмерные коэффициенты δ_{ij} , η_{ij} , γ_{ij} , q_{ij} , h_{ij} , β_{ij} , μ_{ij} малы по сравнению с единицей и являются величинами одного порядка малости ϵ .

Далее в первой главе найдены все возможные случаи наступления параметрического резонанса в системе (3). Показано, что в рассматриваемом

случае появление динамической неустойчивости зависит от значения, которое принимает пара частот (p, ξ) . В силу этого, наличие в системе (3) двух независимых возбуждений приводит к резкому увеличению числа возможных резонансных случаев. Найдено более пятидесяти типов параметрических резонансов (таблица 1), которые условно разделены на три группы: классические резонансы, аддитивные резонансы и особые резонансы.

Классическими резонансами названы параметрические резонансы, возникающие в системе с двумя независимыми параметрическими возбуждениями с частотами изменения параметров (p, ξ) , когда эти возбуждения вызывают параметрический резонанс на разных собственных частотах системы.

Аддитивными резонансами названы параметрические резонансы, возникающие в системе с двумя независимыми параметрическими возбуждениями с частотами изменения параметров (p, ξ) , когда два возбуждения одновременно вызывают параметрический резонанс на одних и тех же собственных частотах системы и выполняется соотношение

$$m p = \xi, \quad (m=1,2).$$

Особыми резонансами названы параметрические резонансы, возникающие в системе с двумя независимыми параметрическими возбуждениями с частотами изменения параметров (p, ξ) , когда два возбуждения одновременно вызывают параметрический резонанс на общих собственных частотах системы и при этом частоты возбуждений не равны. Особые резонансы, образованные сочетанием трех и двух собственных частот системы, названы трех- и двухчастотными особыми резонансами, соответственно.

Показано, что аддитивные и особые резонансы являются отличительной особенностью системы, содержащей два параметрических возбуждения.

Далее в первой главе исследованы все обнаруженные типы аддитивных и особых резонансов. В каждом случае с использованием асимптотических методов, при введении малых, порядка ϵ , частотных расстройок в первом приближении получены в аналитическом виде выражения, определяющие

Резонансы системы с двумя параметрическими возбуждениями

Таблица 1

Классические резонансы				Новые типы резонансов								
Одно возбуждение	Независимое возбуждение				Аддитивные резонансы				Особые резонансы			
	P	ξ	P	ξ	P	ξ	P	ξ	P	ξ	P	ξ
	$p = \xi$ $2p = \xi$ двухчастотные трехчастотные											
$P = \omega_k$	ω_m	$2\omega_k$	ω_m	$(\omega_1 + \omega_m)$	$2\omega_k$	$2\omega_k$	ω_k	$2\omega_k$	Основные комбинированные			
$P = 2\omega_k$	$2\omega_m$	$2\omega_k$	$2\omega_m$	$(\omega_1 + \omega_m)$	$(\omega_k + \omega_m)$	$(\omega_k + \omega_m)$	$1/2(\omega_k + \omega_m)$	$(\omega_k + \omega_m)$	ω_k	$(\omega_k + \omega_m)$	$1/2(\omega_k + \omega_m)$	$(\omega_k + \omega_m)$
$P = 1/2(\omega_k + \omega_m)$	$1/2(\omega_k + \omega_m)$	$2\omega_k$	$1/2(\omega_k + \omega_m)$	$(\omega_1 + \omega_m)$	$ \omega_k - \omega_m $	$ \omega_k - \omega_m $	$1/2 \omega_k - \omega_m $	$ \omega_k - \omega_m $	ω_k	$ \omega_k - \omega_m $	$1/2 \omega_k - \omega_m $	$ \omega_k - \omega_m $
$P = 1/2 \omega_k - \omega_m $	$1/2 \omega_k - \omega_m $	$2\omega_k$	$1/2 \omega_k - \omega_m $	$(\omega_1 + \omega_m)$	$ \omega_k - \omega_m $	$ \omega_k - \omega_m $	$1/2 \omega_k - \omega_m $	$ \omega_k - \omega_m $	$2\omega_k$	$(\omega_k + \omega_m)$	$1/2 \omega_k - \omega_m $	$ \omega_k - \omega_m $
$P = (\omega_k + \omega_m)$	$(\omega_k + \omega_m)$	$2\omega_k$	$(\omega_k + \omega_m)$	$(\omega_1 + \omega_m)$	$(\omega_k + \omega_m)$	$(\omega_k + \omega_m)$	$1/2(\omega_k + \omega_m)$	$(\omega_k + \omega_m)$	$2\omega_k$	$(\omega_k + \omega_m)$	$(\omega_k + \omega_m)$	$(\omega_k + \omega_m)$
$P = \omega_k - \omega_m $	$ \omega_k - \omega_m $	$2\omega_k$	$ \omega_k - \omega_m $	$(\omega_1 + \omega_m)$	$ \omega_k - \omega_m $	$ \omega_k - \omega_m $	$1/2 \omega_k - \omega_m $	$ \omega_k - \omega_m $	$1/2(\omega_k + \omega_m)$	$(\omega_k + \omega_m)$	$1/2 \omega_k - \omega_m $	$ \omega_k - \omega_m $
$\xi = 2\omega_k$			ω_m	$ \omega_1 - \omega_m $		$ \omega_1 - \omega_m $	$ \omega_1 - \omega_m $	$2\omega_k$	$(\omega_k + \omega_m)$	$ \omega_k - \omega_m $	$ \omega_k - \omega_m $	$ \omega_k - \omega_m $
$\xi = (\omega_k + \omega_m)$			$2\omega_m$	$ \omega_1 - \omega_m $		$ \omega_1 - \omega_m $	$ \omega_1 - \omega_m $	$2\omega_k$	$(\omega_k + \omega_m)$	$ \omega_k - \omega_m $	$ \omega_k - \omega_m $	$ \omega_k - \omega_m $
$\xi = \omega_k - \omega_m $			$1/2(\omega_k + \omega_m)$	$ \omega_1 - \omega_m $		$ \omega_1 - \omega_m $	$ \omega_1 - \omega_m $	$2\omega_k$	$(\omega_k + \omega_m)$	$ \omega_k - \omega_m $	$ \omega_k - \omega_m $	$ \omega_k - \omega_m $
			$1/2 \omega_k - \omega_m $	$ \omega_1 - \omega_m $		$ \omega_1 - \omega_m $	$ \omega_1 - \omega_m $	$2\omega_k$	$(\omega_k + \omega_m)$	$ \omega_k - \omega_m $	$ \omega_k - \omega_m $	$ \omega_k - \omega_m $
Комбинированные комбинированные												
			$(\omega_k + \omega_m)$	$ \omega_1 - \omega_m $		$ \omega_1 - \omega_m $	$ \omega_1 - \omega_m $	$ \omega_k - \omega_m $	$(\omega_k + \omega_m)$	$(\omega_k + \omega_m)$	$(\omega_k + \omega_m)$	$(\omega_k + \omega_m)$
			$ \omega_k - \omega_m $	$ \omega_1 - \omega_m $		$ \omega_1 - \omega_m $	$ \omega_1 - \omega_m $	$ \omega_k - \omega_m $	$(\omega_k + \omega_m)$	$(\omega_k + \omega_m)$	$(\omega_k + \omega_m)$	$(\omega_k + \omega_m)$
			$1/2(\omega_k + \omega_m)$	$ \omega_1 - \omega_m $		$ \omega_1 - \omega_m $	$1/2(\omega_k + \omega_m)$	$1/2 \omega_k - \omega_m $	$ \omega_k - \omega_m $	$1/2(\omega_k + \omega_m)$	$1/2 \omega_k - \omega_m $	$(\omega_k + \omega_m)$
			$1/2 \omega_k - \omega_m $	$ \omega_1 - \omega_m $		$ \omega_1 - \omega_m $	$1/2 \omega_k - \omega_m $	$(\omega_k + \omega_m)$	$ \omega_k - \omega_m $	$1/2 \omega_k - \omega_m $	$(\omega_k + \omega_m)$	$(\omega_k + \omega_m)$

области неустойчивости и условия возникновения динамической неустойчивости. В первом приближении выведены дифференциальные уравнения, описывающие поведение амплитуды и фазы решений. Проведен анализ полученных выражений с целью определения условий подавления неустойчивости. Обнаружен ряд особых свойств аддитивных и особых резонансов.

Во второй главе рассматриваются результаты численных экспериментов, проведенных с целью апробации полученных теоретических результатов.

Формулируются основные задачи численных экспериментов:

- проверка, путем численного интегрирования исходных дифференциальных уравнений, наличия областей динамической неустойчивости аддитивных и особых резонансов, определение границ этих областей и сравнение полученных величин со значениями, полученными теоретическим путем. Определение ошибки теоретического метода;
- численная проверка частных случаев и особых свойств резонансов, найденных в ходе теоретических исследований.

Приводится описание расчетной модели и метода исследования. В качестве расчетной модели для численного эксперимента выбран прямой трубопровод большого удлинения ($l/d=500$), имеющий постоянное поперечное сечение. Численное интегрирование системы (3) производилось классическим методом Рунге-Кутты четвертого порядка с шагом 0,0001 с. В качестве критерия неустойчивости решения было выбрано двухсоткратное увеличение амплитуды решения за расчетное время $t_k = 500$ с. Численные эксперименты проводились с помощью программы РРКТ.

Приводится описание результатов численных экспериментов. Для всех рассмотренных в первой главе типов аддитивных и особых резонансов, приведены результаты расчетов границ областей неустойчивости, выполненные по аналитическим зависимостям, а также результаты численного интегрирования. Ошибка в определении границ области определялась как абсолютная величина отношения

$$\Delta = \frac{b_1 - b_2}{S} 100\% \quad (4)$$

где b_1 - значение частоты на границе области неустойчивости, определенное по аналитическим зависимостям, Гц; b_2 - значение частоты на границе области неустойчивости, найденное из численного эксперимента, Гц; S - ширина области неустойчивости, определенная по аналитическим зависимостям, Гц.

Показано, что во всех экспериментах величина ошибки не превышала 5%. На основании полученных результатов делается вывод о достоверности найденных аналитических зависимостей для определения границ областей неустойчивости аддитивных и особых резонансов.

Приводятся результаты проверки условий существования аддитивных и особых резонансов. Показано, что при нарушении условий не происходит возникновения резонансов.

В ряде численных экспериментов вместе с решениями исходной системы дифференциальных уравнений $\varphi(t)$ определялись соответствующие им решения приближенных дифференциальных уравнений для амплитуды решения $a(t)$. Решения строились в координатах (φ, t) и (a, t) на одном и том же графике. Показано хорошее совпадение численного решения приближенных дифференциальных уравнений с численным решением системы исходных дифференциальных уравнений.

Далее во второй главе приводятся результаты экспериментов, подтверждающие существование особых свойств аддитивных и особых резонансов. Приводятся примеры подавления динамической неустойчивости в случае аддитивного резонанса, примеры расширения области неустойчивости аддитивных резонансов при введении демпфирования, примеры сужения области неустойчивости при увеличении одного из возбуждений в особых резонансах.

В приложении приводится описание программы РРКТ, разработанной для вычисления областей неустойчивости, условий возникновения неустойчивости и особых свойств аддитивных и особых резонансов по формулам, полученным в первой главе диссертационной работы, и

проведения численных экспериментов по изучению динамики трубопровода с двумя параметрическими возбуждениями.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Изучен вопрос о параметрических колебаниях прямого трубопровода с протекающей жидкостью, находящегося под действием двух независимых параметрических возбуждений, частота которых сравнима с частотой собственных колебаний системы.

2. Получена в наиболее общем виде система линейных дифференциальных уравнений динамической устойчивости прямого трубопровода, содержащего неразрывный поток невязкой несжимаемой жидкости, скорость которой имеет как постоянную, так и небольшую переменную составляющую, изменяющуюся по гармоническому закону, нагруженного продольной силой, изменяющейся по гармоническому закону.

3. В первом приближении установлены все возможные случаи наступления параметрического резонанса в системе. Показано, что действие на систему двух параметрических возбуждений приводит к резкому увеличению числа резонансов, возможных в системе. Проведена классификация возможных резонансных случаев.

4. Найдены и исследованы новые типы параметрических резонансов, присущие только системам с двойным параметрическим возбуждением: аддитивные и особые резонансы.

5. Получены приближенные аналитические зависимости, позволяющие рассчитать области динамической неустойчивости для всех новых типов параметрических резонансов.

6. Получены в аналитическом виде условия существования областей динамической неустойчивости новых типов параметрических резонансов, позволяющие, не решая исходной системы дифференциальных уравнений, по виду коэффициентов системы или только знаков этих коэффициентов судить

о возможности возникновения в конкретном случае резонансов определенного типа.

7. Найден способ наглядного представления условий существования областей динамической неустойчивости на плоскости параметров системы, позволяющий при проектировании производить поиск оптимальных конструкций с минимальными затратами времени.

8. Получены дифференциальные уравнения, описывающие в первом приближении поведение амплитуды и фазы решений в окрестностях областей неустойчивости аддитивных и особых резонансов.

9. Доказано, что аддитивные резонансы являются более общим случаем известных основных и комбинационных резонансов, возникающих в системе с одним параметрическим возбуждением. Получено обобщенное «правило знаков» для аддитивных резонансов. Получено условие расширения области неустойчивости аддитивных резонансов при введении в систему линейного демпфирования.

Обнаружено, что в аддитивном резонансе динамическая неустойчивость может быть устранена за счет взаимодействия двух параметрических возбуждений. Найдены соответствующие условия для параметров возбуждений.

10. Обнаружено, что в некоторых типах особых резонансов при увеличении амплитуды одного из возбуждений область динамической неустойчивости не расширяется, а, наоборот, сужается. Получены условия, при которых данное явление имеет место.

11. Полученные в работе теоретические результаты проверены при помощи численных экспериментов на ЭВМ. Результаты экспериментов с высокой точностью совпали с результатами вычислений по полученным формулам.

12. Создано программное обеспечение для операционной системы Windows 95, позволяющее производить исследования и практические расчеты динамической устойчивости реальных трубопроводов с двумя

параметрическими возбуждениями, проводить количественный и качественный анализ конструкций.

РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Челомей С.В., Щеглов Г.А. Параметрические резонансы в трубопроводах, нагруженных переменной осевой силой при протекании через них пульсирующей жидкости // Доклады АН РФ. -1998. -Т. 364, № 1. -С. 57-60.
2. Челомей С.В., Щеглов Г.А. О динамической устойчивости прямого трубопровода нагруженного переменной осевой силой при протекании через него пульсирующей жидкости // Известия АН РФ. Механика твердого тела. - 1998. -№6. -С.175-184.
3. Щеглов Г.А. Особенности одновременного воздействия двух параметрических возбуждений на трубопровод летательного аппарата // Тез. докл. студенческой НТК аэрокосмического факультета МГТУ им. Н.Э. Баумана при НПО Машиностроения. -М., 1998. -С.6.

Подписано к печати 04.10.1999 г. Зак. 126. Объем 1.0 п.л. Тираж 100 экз.

Типография МГТУ им. Н.Э.Баумана