

ти турбомашин: Тез. докл. в 2-х ч. - Киев: Ин-т проблем прочности, 1987: Ч. 2. Стендовые доклады. - С. 22.

16. Еленевский Д.С., Малыгин В.В., Чижова Н.М., Вильнер И.П. О возможности имитации эксплуатационного возбуждения вентиляторов ГТД при стендовых испытаниях // Конструкционная прочность двигателей: Тез. докл. IX Всесоюз. науч.-техн. конф. - Куйбышев, 1983. - С. 60-61.

УДК 621.643

Е.А.Панин

### ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПУЧКОВ ТРУБОПРОВОДОВ С КОНСТРУКЦИОННЫМ ДЕМПФИРОВАНИЕМ

Объединение большого количества трубопроводов значительной протяженности в пучки связывают с вопросами улучшения компоновки, уменьшения массы и габаритов, упрощения монтажа и обеспечения ремонтпригодности трубопроводных систем.

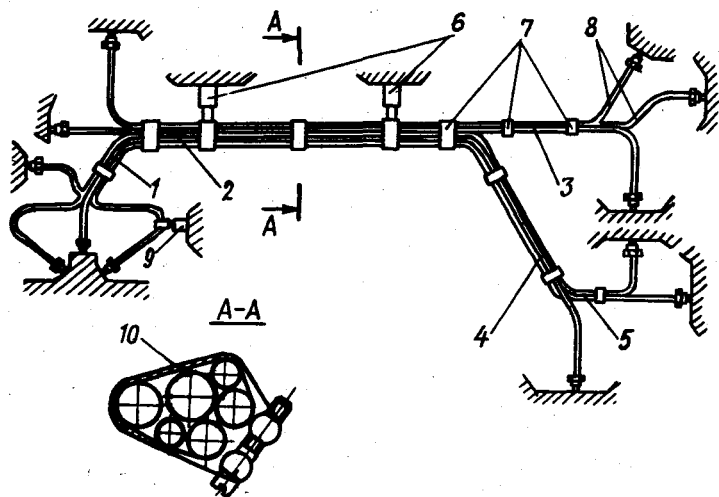
Конструктивно-функциональный анализ пучков показал целесообразность их использования для повышения вибрационной прочности и надежности трубопроводных систем, работающих в экстремальных условиях вибрационных воздействий.

По сравнению с сосредоточенным демпфированием трубопроводных систем с помощью упругодемпфирующих опор, в пучках реализуется распределенное конструктивное демпфирование, благодаря которому обеспечивается большая способность к поглощению энергии. Это приводит к более эффективному снижению уровня действующих резонансных напряжений в трубопроводах; к уменьшению количества или полному исключению промежуточных опор крепления, через которые обычно передается кинематическое возбуждение; к увеличению длин пролетов, снижению массы и габаритов системы.

Пучок представляет собой сборочную единицу, содержащую, по крайней мере, два трубопровода, которые конструктивно связаны между собой в упругую систему, имеющую соприкасающиеся участки. На поверхностях соприкосновения (в узлах трения) этих участков создана сдвливающая поперечная нагрузка. При циклическом деформировании пучка на соприкасающихся участках возникают касательные напряжения, которые являются

причиной появления взаимного относительного перемещения (так называемого проскальзывания трубопроводов). Циклическая энергия поглощения определяется работой, совершаемой силами трения на пути, равном сумме взаимных относительных перемещений в узлах трения в течение одного цикла нагружения.

На рис. 1 показана схема упругой колебательной системы пучка трубопроводов. Она представляет собой совокупность и последовательность размещения структурных элементов конструкции пучка (соприкасающихся участков, одиночных трубопроводов, опор крепления, компенсаторов, арматуры), определяющих ее динамические характеристики.



Р и с. 1. Схема упругой колебательной системы пучка:  
1-5 - участки соприкасающихся трубопроводов; 6, 9 - опоры; 8 - одиночные трубопроводы; 7, 10 - стяжные хомуты

Процесс целенаправленного формирования упругой колебательной системы пучка, являясь одним из ответственных этапов его проектирования, должен обеспечить максимальное демпфирование в заданных условиях эксплуатации.

Большими потенциальными возможностями конструкционного демпфирования обладают пучки, у которых протяженность соприкасающихся участков наибольшая.

В реальных конструкциях пучков рассмотренный механизм образования сил трения в узлах трения чаще всего возникает при изгибных деформациях и реже — при крутильных. Взаимные относительные проскальзывания в узлах трения определяются формой эпюр касательных напряжений и поперечных сдвигающих нагрузок и могут распространяться как по длине, так и по поперечному сечению одновременно или постепенно. Желательно, чтобы относительные перемещения происходили одновременно. Это увеличивает демпфирующую способность пучка. При этом необходимо учитывать, что из трех этапов деформирования пучков (нерасслоенного, промежуточного и полностью расслоенного) только два последних приводят к возникновению конструкционного демпфирования.

Конструктивно-функциональный анализ соприкасающихся участков пучков позволил выделить в них ряд независимых параметров. Целенаправленно управляя ими, можно добиться повышения демпфирующей способности конструкции.

Одним из важных параметров является безразмерная относительная жесткость, равная отношению нерасслоенной и расслоенной жесткостей и определяемая из простых геометрических характеристик поперечного сечения рассматриваемых участков трубопроводов, выполненных из одного материала:

$$r_v = \frac{J_{NV}}{J_{pH}}; \quad r_u = \frac{J_{Nu}}{J_p},$$

где  $J_{NV}$ ,  $J_{Nu}$  — моменты инерции сечения нерасслоенного пучка относительно главных центральных осей инерции  $v, u$ ;  $J_p = \sum_{i=1}^{i=K} J_i$  — момент инерции сечения полностью расслоенного пучка;  $J_i$  — момент инерции  $i$ -го трубопровода пучка относительно собственной оси;  $K$  — количество трубопроводов в пучке.

Относительная жесткость используется при сравнении различных конструкций пучков: чем она больше, тем выше потенциальные возможности демпфирования участка пучка.

Симметричные участки пучков, у которых моменты инерции  $J_{NV}$  и  $J_{Nu}$ , а также главные радиусы инерции одинаковы, называются изотропными. Они имеют идентичные упругодемпфирующие характеристики в различных направлениях. В анизотропных участках пучков такого не наблюдается. В них при деформациях в направлениях с меньшей относи-

тельной жесткостью, при прочих равных условиях, будет меньшее демпфирование.

Мерой анизотропии может служить безразмерный коэффициент

$$\bar{F} = \frac{J_{HII}}{J_{HV}},$$

где  $J_{HII}$ ,  $J_{HV}$  - минимальное и максимальное значения главных центральных моментов инерции сечений нерасслоенного пучка. У анизотропных пучков этот коэффициент меньше единицы.

В известных границах величинами  $r_V$ ,  $r_V$ ,  $\bar{F}$  можно управлять, формируя геометрическое строение пучка - количество, типоразмер и взаимное расположение трубопроводов. Управляя анизотропией, осуществляют частотную отстройку системы. Однако увеличение анизотропии приводит к падению демпфирующей способности пучков при их колебаниях в плоскостях с минимальной безразмерной относительной жесткостью.

Важной чертой конструкционного демпфирования является создание с помощью стяжных хомутов поперечной сдавливающей нагрузки в узлах трения реальных пучков. Такое конструктивное решение позволяет изменением количества стяжных хомутов, расстановкой их по длине пучка и регулированием усилия затяжки управлять работой, совершаемой силами трения. Для получения наибольшего эффекта необходимо, чтобы эпюры касательных напряжений и поперечных сдавливающих нагрузок в узлах трения как по длине, так и по поперечному сечению были приведены в необходимое соответствие. Этому способствуют специальные конструкции стяжных хомутов, обеспечивающие создание и сохранение необходимой сдавливающей нагрузки. Корпус таких хомутов может быть жестким или гибким. Малая изгибная жесткость корпуса достигается применением многослойных стальных лент. Для ряда схем пучков стяжные хомуты рекомендуется размещать в сечениях, где взаимные относительные перемещения трубопроводов наибольшие (например, в узловых сечениях).

Соприкосновение трубопроводов происходит по линиям, количество которых определяется строением участка пучка и должно быть наибольшим. При действии сдавливающей поперечной нагрузки и взаимном относительном перемещении трубопроводов из линий формируются зоны фактического касания. При проектировании пучков может возникнуть необходимость в мерах защиты этих зон от повреждаемости. Выбор окончательного варианта в процессе проектирования и доводки пучков с высокими демпфирующими свойствами возможен при сравнительной оценке

количественных показателей интенсивности конструкционного демпфирования рассматриваемых моделей пучков с различными комбинациями их изменяемых конструктивных параметров. Надежные оценки можно получить, используя экспериментальные методы исследования, например статические. С этой целью выбрана простая модель стэнда, представляющая собой прямолинейный участок соприкасающихся трубопроводов, заземленный с одного конца и нагружаемый переменной силой с другого (свободного) конца. Расчетная схема модели приближенно рассматривается как четверть волны выбранного участка пучка бесконечной длины, колеблющегося по одной из высших форм. Заделкой является вершина упругой линии, а свободным концом — точка перегиба. Взаимные относительные перемещения в заделке отсутствуют, а на свободном конце они наибольшие.

Основные физические процессы деформирования отражены в графической зависимости сила  $P$  — перемещение  $u, v$  в виде поля петель гистерезиса, которое дает необходимую и достаточную информацию для комплексного изучения упругодемпфирующих характеристик и выявления общих закономерностей их поведения.

На рис. 2 показано поле петель гистерезиса одной из компоновок изотропного ( $\bar{\nu} = 1$ ) участка пучка длиной  $l = 442$  мм, состоящего из семи трубопроводов (материал 12Х18Н10Т) с наружными диаметрами  $d = 8; 10$  мм без промежуточных стяжных хомутов ( $n = 0$ ), полученное при испытаниях в режиме плоского нагружения. Нагружающее устройство и промежуточные стяжные хомуты представляют собой штатные хомуты с номинальными усилиями затяжки.

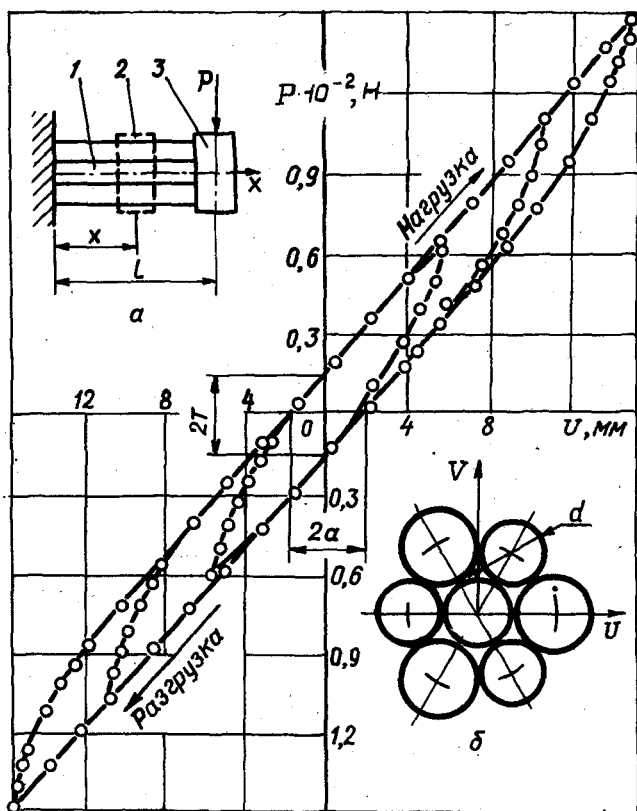
Исследовались и другие компоновки с одним ( $n = 1$ ), двумя ( $n = 2$ ) и тремя ( $n = 3$ ) промежуточными стяжными хомутами, устанавливаемыми в различных местах:  $\bar{X} = \frac{x}{l} = 0,75; 0,50; 0,25$ . Показано, что рассматриваемую модель можно отнести к системам с неизменяющимися по величине за цикл нагружения силами трения. Расслоенная жесткость этой модели

$$C_p = \frac{T}{a},$$

где  $T, a$  — обобщенная сила трения и перемещение соответственно.

Нерасслоенная жесткость определяется выражением

$$C_H = C_p r.$$



Р и с. 2. Поле петель гистерезиса: а - схема стенда; б - строение участка пучка; 1 - соприкасающийся участок; 2 - стяжной комут; 3 - нагружающее устройство

Результаты испытаний этих компоновок показаны в таблице, где приведены основные параметры, характеризующие поле петель гистерезиса.

Интенсивность конструкционного демпфирования, мерой которой может служить обобщенная сила трения, возрастает с количеством стяжных комут и определяется местом их расположения. Максимальная интенсивность достигается при  $\eta = 3$ , при этом коэффициент

$n$	$\bar{X}$	$T, H$	$\alpha \cdot 10^3, \frac{M}{M}$	$r$
0	-	14,8	1,7	5,65
1	0,50	21,0	2,3	
2	0,50; 0,25	23,7	2,7	
2	0,75; 0,50	31,9:	3,6	
3	1,0...0,75	32,0	3,5	
3	0,75; 0,50; 0,25	39,3	4,4	

поглощения превышает величину 1,74. Для нахождения связи между геометрическими параметрами участка пучка можно воспользоваться соотношением

$$C_p = m E J_p l^{-3},$$

где  $m$  - поправочный коэффициент, зависящий от вида модели участка пучка (для консольной модели  $m = 3$ );  $E$  - модуль упругости материала трубопроводов. Жесткости  $C_p, C_H$ , полученные расчетным путем, отличаются от экспериментальных с погрешностью до 8%.

УДК 621.45.00.11-752

И. Л. Письменный

О НАЛИЧИИ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ НЕЖЕЛАТЕЛЬНЫМИ ЯВЛЕНИЯМИ  
В МНОГОРОТОРНЫХ ГТД, ИХ ВИБРАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ  
И СООТНОШЕНИЯМИ ЧАСТОТ ВРАЩЕНИЯ РОТОРОВ

Из теории многочастотных колебаний известно (см., например, [1]), что в тех случаях, когда частоты составляющих колебаний, одновременно действующих в нелинейной системе, относятся как целые числа  $m:n$  ( $m=1,2,\dots; n=2,3,\dots; m \neq n$ ), имеет место взаимное влияние колебаний на разных частотах, в том числе существенное увеличение амплитуды колебаний на одной из этих частот. Наиболее значительно эффект усиления колебаний проявляется в тех случаях, когда одна из частот равна, близка или кратна так называемой собственной частоте системы [1]. Это связано с тем, что при наличии в системе нелинейных элементов каждая частота на входе такого элемента может породить на его выходе спектр