

# Исследование влияния размеров и расположения локальных дефектов на изменение спектра частот собственных колебаний стальных конструкций

**С.П. Суцев**, генеральный директор, д-р техн. наук, профессор

**В.В. Самарин**, главный научный сотрудник, д-р техн. наук, профессор

**А.А. Суслонов**, начальник отдела, канд. техн. наук

**А.М. Новгородова**, старший инженер

ООО «Центр исследования экстремальных ситуаций», г. Москва

e-mail: esrc@esrc.ru

## Ключевые слова:

дефект,  
частота собственных колебаний,  
спектр частот,  
генетическая нелинейность,  
колебания,  
мониторинг,  
предельное состояние,  
пороговое значение,  
объекты,  
дефект,  
повреждение.

*В статье рассмотрены вопросы, связанные с исследованием влияния размера и расположения локальных дефектов на изменение спектра частот собственных колебаний модели стальной трубы, закрепленной на одном торце. Исследования выполнены с использованием метода конечных элементов (МКЭ) и вычислительного комплекса SCAD. Установлена нелинейная зависимость частот собственных колебаний от размера дефекта и места его расположения. Такая нелинейность в процессе накопления дефектов относится к генетической нелинейности. Выполненные исследования показали, что при мониторинге основных динамических характеристик в процессе эксплуатации сооружения по характеру их изменения можно определить масштаб и расположение дефектов.*

## 1. Предисловие

Сложные инженерные сооружения и здания в процессе эксплуатации испытывают значительные статические и динамические нагрузки, которые часто приводят к изменению их положения в пространстве, к нарушению целостности, образованию локальных и площадных повреждений и дефектов, а иногда и к разрушению. Поэтому своевременный неразрушающий контроль за состоянием несущих конструкций с помощью современных автоматизированных средств диагностики позволяет оперативно реагировать на изменение динамических характеристик сооружений и своевременно предупреждать чрезвычайные ситуации.

Известно, что частоты и формы собственных колебаний являются важнейшими динамическими характеристиками конструкций. Зная частоты и формы собственных колебаний, инженер в общем случае имеет возможность решать различные задачи. Остановимся на двух из них.

*Первая задача* состоит в том, что, зная частоты и формы, а также возмущающие нагрузки, можно не

только полностью провести динамический расчет конструкции, но и предусмотреть возможные мероприятия по уменьшению ее колебания. При этом результаты расчетов, например, на гармонические нагрузки при резонансе или вблизи резонанса очень чувствительны к малейшим изменениям характеристик рассчитываемой динамической системы, ибо даже небольшое изменение собственных частот может во много раз увеличить или уменьшить амплитуду колебаний [1]. Поэтому при расчете на периодические нагрузки обязательно должна учитываться возможная неточность в определении собственных частот, а также возможность изменения собственных частот конструкций в процессе эксплуатации здания или сооружения.

*Вторая задача*, учитывая, что частоты и формы собственных колебаний непосредственно связаны с жесткостью конструкции, которая в свою очередь зависит от модуля деформации и геометрических характеристик, состоит в том, что изменения частот (или периодов) собственных колебаний и других динамических характеристик в процессе эксплуатации

конструкции «...могут быть использованы в качестве индикаторов и симптомов для конструкций до некоторой степени в том смысле, в каком врачи используют пульс, давление крови, температуру тела и т. д. для целей диагноза» [2], т. е. данные об изменении частот и форм собственных колебаний конструкций, по-видимому, могут использоваться в процессе мониторинга находящихся в эксплуатации зданий и сооружений.

Существует несколько способов возбуждения колебаний сооружений для записи их динамических характеристик. Часто испытания проводятся с помощью вибромашин или микросейсмических воздействий. В [3] подробно описаны достоинства и недостатки этих способов. Однако отметим, что каким бы способом ни были определены частоты и формы собственных колебаний и особенно их изменение в процессе эксплуатации сооружения, вопрос об интерпретации этих изменений, т. е. выяснение причин такого изменения частот собственных колебаний, остается актуальным.

В связи с этим обращает на себя внимание одно существенное противоречие, заключающееся в том, что, с одной стороны, как указывалось выше, даже небольшое изменение собственных частот может во много раз увеличить или уменьшить амплитуду колебаний. С другой стороны, существующая нормативная и справочная литература, например [1], рекомендует величину возможной погрешности определения частот принимать равной от 0,15 до 0,35 в зависимости от конструкции и ее расчетной схемы.

По-видимому, существует несколько вариантов решения этого противоречия, в первую очередь путем установления основных закономерностей изменения частот собственных колебаний, как правило, их уменьшения в процессе эксплуатации сооружения. При этом следует отметить, что такие общие рассуждения, как, например, о том, что уменьшается жесткость конструкции из-за появления трещин в бетоне и кирпиче или пластических деформаций в металлах, что приводит к нелинейному поведению конструкции и уменьшению частот собственных колебаний, не могут решить проблемы, так как не содержат никаких количественных оценок. Одним из путей решения этой проблемы является комплексное изучение поведения конструкции при контролируемом изменении ее состояния с фиксацией частот собственных колебаний, соответствующих каждому измененному состоянию.

К работам такого направления можно отнести исследования, выполненные в Японии и США. На натуральных сооружениях, подлежащих сносу, определялась действительная разрушающая нагрузка на здания, изменение жесткости, периоды колебаний

и затухания в процессе накопления повреждений [4]. В табл. 1 представлены данные этих и некоторых других натуральных испытаний в начале и конце эксперимента, когда в зданиях начиналось прогрессирующее нарастание пластических деформаций, трещин и других повреждений. В этой таблице даны отношения частот в конце эксперимента к частотам в начале эксперимента для некоторых типов испытываемых объектов. Диапазон изменения этих отношений составляет от 0,7 до 0,26.

В [5] представлены вибрационные испытания различных типов специальных конструкций вплоть до разрушения с помощью малого вибратора и большой вибромашин. Результаты изменения основных частот собственных колебаний в процессе испытаний представлены в табл. 2 [5]. Там же даны отношения частот в конце эксперимента к частотам в начале эксперимента. Диапазон изменения этих отношений составляет от 0,514 до 0,19. При этом в крупноблочных железобетонных конструкциях во время испытаний не наблюдалось никаких разрушений в несущих элементах конструкции, исключая волосные трещины в растворных швах. В кирпичной конструкции при частоте 4,44 Гц (табл. 2), что составило 0,64 от первоначальной частоты, наблюдались волосные трещины на уровне чердачного перекрытия двухэтажного здания, а при частоте 2,3 Гц (0,43 от первоначальной) образовалась полная разрушительного типа трещина по всей стене до самого фундамента. В предварительно напряженной железобетонной каркасной конструкции при частоте колебаний 4,2 Гц (0,88 от первоначальной) наблюдались трещины; при частоте колебаний 3,096 Гц (0,65 от первоначальной) произошло разрушение от изгиба в основании колонны; при частоте колебаний 2,28 Гц (0,48 от первоначальной) произошло резкое внезапное разрушение двухэтажного здания.

Таблица 1

Данные натуральных испытаний

Характеристика испытываемого объекта	Частота собственных колебаний, Гц		
	в начале эксперимента (1)	в конце эксперимента (2)	отношение (2)/(1)
Рама без заполнения	3,57	2,43	0,68
Рама с заполнением	5,56	3,45	0,62
Рама без заполнения	7,14	3,45	0,48
Железобетонная стена-диафрагма	7,14	5,00	0,70
Железобетонные каркасные здания	10–6,67	4–4	0,4–0,6
Фрагмент крупнопанельных зданий в 1/4 натуральной величины	10–14,3	3,57–3,7	0,36–0,26
Среднее значение			0,512

Вибрационные испытания конструкций различного типа

№ п/п	Тип испытаний Конструкция	Направление	Частота собственных колебаний (Гц) (малый вибратор)			Частота собственных колебаний (Гц) (большая вибромашина)			
			начало испытаний (1)	конец испытаний (2)	отношение (2)/(1)	начало испытаний (3)	отношение (3)/(1)	конец испытаний (4)	отношение (4)/(1)
1	Однопустотные железобетонные блоки	С-Ю	5,62	5,35	0,95	3,5	0,62	2,35	0,42
		В-З	6,33	6,17	0,98	3,76	0,594	2,35	0,37
2	Железобетонные блоки	С-Ю	5,85	5,75	0,98	3,55	0,606	2,41	0,41
		В-З	6,29	6,13	0,98	3,55	0,56	2,41	0,38
3	Железобетонный блочный каркас	С-Ю	5,62	5,52	0,98	3,096	0,55	2,62	0,47
		В-З	5,49	5,15	0,94	3,096	0,56	2,62	0,48
4	Кирпич	С-Ю	5,35	4,57	0,85	3,44	0,64	2,3	0,43
		В-З	5,18	5,08	0,98	3,44	0,66	2,3	0,44
5	Железобетонный сборный каркас	С-Ю	4,88	4,81	0,985	2,52	0,52	0,91	0,19
		В-З	4,37	3,91	0,89	2,19	0,5	0,91	0,21
6	Легкий металлический каркас	С-Ю	3,57	3,03	0,85	2,3	0,64	1,1	0,31
		В-З	–	–	–	–	–	–	–
7	Предварительно напряженная железобетонная каркасная конструкция	С-Ю	4,78	4,2	0,88	3,096	0,65	2,28	0,48
		В-З	4,59	4,4	0,96	3,38	0,74	2,36	0,514
<i>Среднее значение</i>								0,369	

Таким образом, выполненные натурные испытания показали, что при резонансном нагружении сначала образуются небольшие локальные дефекты в виде трещин, которые незначительно снижают основные частоты собственных колебаний. Дальнейшее разрастание этих локальных дефектов приводит к более существенному снижению частот. К сожалению, в [5] исследовалось поведение только одной основной частоты собственных колебаний. Как при этом изменялись другие частоты, неизвестно.

В процессе эксплуатации зданий и сооружений металл, железобетон, кирпич и другие материалы подвержены коррозии, что может привести к существенному локальному уменьшению толщины конструкции или как, например, в дымовых металлических трубах к сквозным прогарам различных размеров. Внутренние пустоты в кирпичной кладке могут быть фактором, уменьшающим ее модуль упругости. Эти и другие локальные дефекты, снижающие жесткость конструкций, могут стать причиной уменьшения частот собственных колебаний.

Исследованию влияния локальных дефектов на изменение частот собственных колебаний конструкций посвящена настоящая работа. Основная цель: установить с помощью вычислительного эксперимента закономерность изменения частот собственных колебаний простейшей упругой конструкции в виде заземленной на одном торце металлической трубы-оболочки в зависимости от размера одиночного локального дефекта (сквозного квадратного отверстия в стенке трубы) и места расположения этого дефекта относительно заделки, а также от двух и трех

одинаковых отверстий, различным способом размещенных по высоте трубы.

## 2. Постановка вычислительного эксперимента и исходные данные

Для проведения вычислительного эксперимента в качестве объекта исследования была принята металлическая труба (рис. 1), заземленная снизу. В случае отсутствия каких-либо дефектов ее можно рассматривать как стержень постоянного сечения, для которого аналитически можно вычислить все частоты

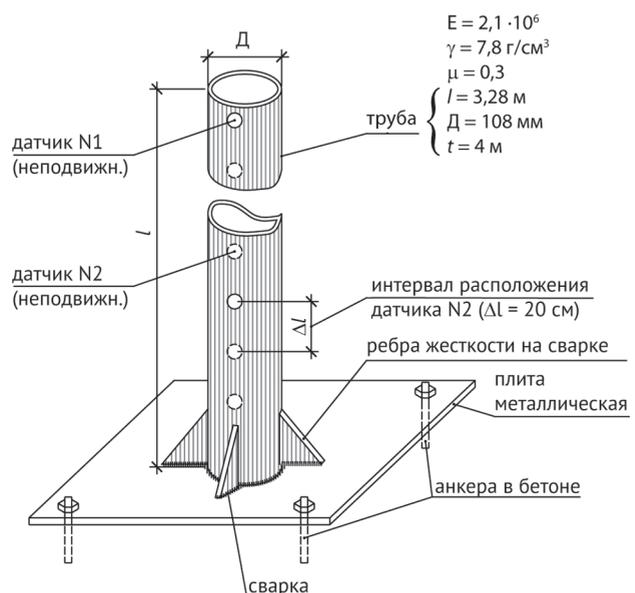


Рис. 1. Схема трубы и установки датчиков

и формы собственных поперечных, крутильных и продольных колебаний [6].

Однако при наличии каких-либо отверстий в трубе использование аналитических методов вызывает большие трудности, так как необходимо решать задачу о колебаниях стержня с переменным неосесимметричным поперечным сечением в месте расположения дефекта. В связи с этим предлагается решать пространственную упругую задачу, в которой труба рассматривается как цилиндрическая тонкостенная оболочка с заземленным одним концом, численным методом конечных элементов (МКЭ) с использованием вычислительного комплекса SCAD (версия 7.31R3) [7].

С этой целью вся труба — цилиндрическая оболочка — разбивается на конечные четырехугольные оболочные элементы с размерами ячейки регулярной сетки 2×2 см. При длине окружности трубы  $S = 2\pi R \approx 34$  см в расчетной схеме будет 17 конечных элементов в кольцевом направлении, а по высоте трубы ( $l = 3,28$  м) — 164 таких кольца, т. е. всего расчетная схема МКЭ имеет 2788 конечных элементов (рис. 2).

Прежде чем исследовать изменение частот в трубе-оболочке с дефектами, была выполнена оценка достоверности результатов и возможности использования предлагаемой расчетной схемы МКЭ. Для этого труба сначала была взята без дефектов, что позволило рассматривать ее как стержень постоянного сечения. В таком стержне, во-первых, аналитически [6] было вычислено десять первых частот поперечных колебаний, три частоты крутильных и три частоты продольных собственных колебаний (табл. 3). Во-вторых, численным методом для этого же стержня, состоящего из 10 конечных стержневых элементов, были определены те же частоты, кроме крутильных (табл. 3).

Кроме того, в лаборатории были выполнены натурные испытания<sup>1</sup> этой гладкой без дефектов заземленной металлической трубы (рис. 3) для определения трех первых частот и форм поперечных

Таблица 3  
Результаты аналитических расчетов и эксперимента

Тип колебания	№ формы колебания	Аналитический стержень	ТЕОРИЯ				ЭКСПЕРИМЕНТ	
			численно МКЭ (SCAD)				Гц	% (*)
			стержень		оболочка			
Гц	% (*)	Гц	% (*)	Гц	% (*)	Гц	% (*)	
Поперечные колебания	$\omega_{10}$	9,72	9,795	0,82	10,02	3,09	8,71	-11,4
	$\omega_{20}$	60,9	60,7	-0,32	62,11	1,99	55,86	-8,27
	$\omega_{30}$	170,5	118,27	-1,3	171,11	0,35	155,5	-8,8
	$\omega_{40}$	334,14	326,3	-2,34	327,74	-1,91	-	-
	$\omega_{50}$	552,36	533,4	-3,43	527,02	-4,6	-	-
	$\omega_{60}$	825,08	786,05	-4,73	762,76	-7,5	-	-
	$\omega_{70}$	1152,38	1076	-6,63	-	-	-	-
	$\omega_{80}$	1534,24	1382,7	-9,88	-	-	-	-
	$\omega_{90}$	1970,65	1665,7	-15,4	-	-	-	-
	$\omega_{100}$	2461,6	1897	-22,9	-	-	-	-
Крутильные колебания	$\omega_1^{кр}$	240,0	-	-	237,65	-1	-	-
	$\omega_2^{кр}$	722,0	-	-	712,93	-1,26	-	-
	$\omega_3^{кр}$	1203,4	-	-	-	-	-	-
Продольные колебания	$\omega_1^{прод}$	388,0	389,07	0,26	389,54	0,3	-	-
	$\omega_2^{прод}$	1164,28	1157,63	-0,57	-	-	-	-
	$\omega_3^{прод}$	1940,46	1867	-3,8	-	-	-	-

(\*) — расхождение в % с точным аналитическим решением для стержня постоянного сечения;

Курсивом выделены значения частот, взятых за исходные для гладкой трубы-оболочки (без дефектов) при всех дальнейших сравнениях.

колебаний. Эксперимент проводился с использованием разработанного сотрудниками ООО «Центр исследования экстремальных ситуаций» мобильного диагностического комплекса «Стрела-2», который со-

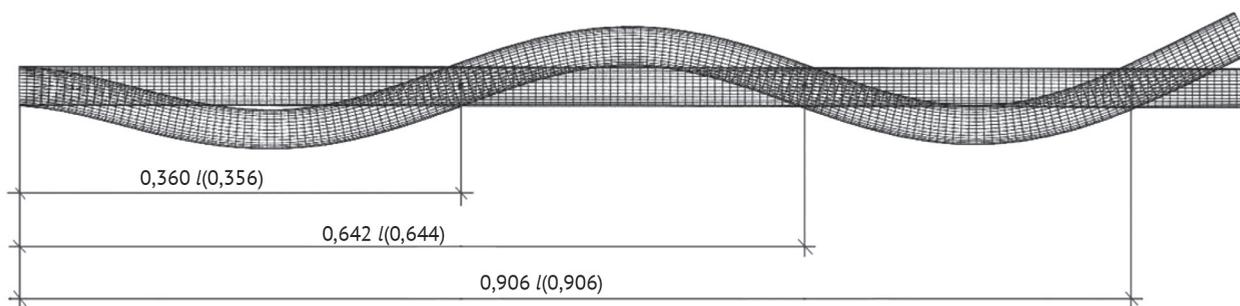


Рис. 2. Труба без дефектов. Частота  $\omega = 327,745$  Гц (4 форма поперечных колебаний)

<sup>1</sup> Работы выполнялись совместно с кандидатом технических наук Сотиним В.Н.

стоит из следующих элементов: трехкомпонентных сейсмовибрационных датчиков; соединительных кабелей; многоканального аналого-цифрового преобразователя; компьютера с пакетом программ для анализа сейсмовибрационных сигналов.

С помощью датчиков колебаний осуществлялась регистрация амплитудно-временных зависимостей колебаний трубы, вызванных легким ударом по ней. Затем эти зависимости обрабатывались на ПЭВМ с использованием программного обеспечения «Стрела-2». При этом датчики располагались на трубе следующим образом (рис. 1, 3): в верхней части трубы на отметке 3,25 м датчик N1, который во время эксперимента оставался неподвижным; датчик N2 перемещался вниз по образующей и устанавливался по высоте трубы через каждые 20 см (от отметки 3,2 м до отметки 0,2 м) и на отметке 0,05 м (около защемления). В результате обработки экспериментальных данных получены три первые частоты (табл. 3) и три формы собственных колебаний.

Анализ всех полученных результатов по определению частот собственных колебаний стержня без дефектов и представленных в табл. 3 показывает, что все три способа (один аналитический и два численных) теоретического определения шести первых собственных частот поперечных колебаний, двух частот крутильных и трех частот продольных колебаний дают близкие результаты:

- максимальное расхождение по поперечным частотам составляет 7,5% (для шестой формы колебаний оболочки);
- максимальное расхождение по двум частотам крутильных колебаний составляет 1,26%;
- максимальное расхождение по частотам трех форм продольных колебаний — 3,8%.

Натурный эксперимент по определению частот поперечных колебаний показал, что наибольшее расхождение с теорией имеет собственная частота по первой форме колебаний (11,4%). По-видимому, это результат не совсем качественного устройства защемления на натуре. Но так как в дальнейшем выполнялись только вычислительные эксперименты, этот факт не имеет существенного значения.

Сравнение форм (эпюр) колебаний, полученных разными способами, показало вполне удовлетворительную сходимость. При этом координаты узловых точек в формах собственных колебаний, вычисленные в стержне аналитически, практически точно совпадают с координатами узлов, полученными в трубе-оболочке МКЭ. Для примера на рис. 2 приведены координаты узловых точек для четвертой формы колебаний.

Выполненное сравнение показывает, что принятая расчетная схема, состоящая из 2788 конечных элемен-



Рис. 3. Стальная труба с защемлением на одном торце

тов, вполне приемлема и может быть использована для исследования первых шести форм поперечных, двух форм крутильных и одной формы продольных колебаний при наличии в трубе-оболочке локальных дефектов (отверстий). Полученные частоты колебаний гладкой без дефектов трубы-оболочки, приведенные в табл. 3, принимались в дальнейших исследованиях за исходные, с которыми сравнивались все остальные частоты, полученные для трубы-оболочки с дефектами.

Места расположения отверстий по высоте трубы выбирались таким образом, чтобы они были, во-первых, равномерно распределены по высоте трубы, во-вторых, по возможности как можно ближе к узловым точкам и точкам с максимальными амплитудами пяти первых форм собственных поперечных колебаний. В расчетах интервал расположения отверстий по высоте трубы-оболочки взят равным  $h = 0,5$  м, или в относительных величинах  $h/l \approx 0,15$ . Таким образом, относительные отметки, на которых последовательно располагались одиночные отверстия, принимались  $h/l = 0,15; 0,3; 0,45; 0,6; 0,75$  и  $0,9$ .

Размер отверстия изменялся на каждой отметке следующим образом. Чтобы как можно меньше вносить изменений в расчетную сетку конечных элемен-

тов, сторона ( $a$ ) квадратного отверстия принималась кратной размеру ячейки, т. е.  $a = 4$  см (2 ячейки); 10 см (5 ячеек), 14 см (7 ячеек) и 20 см (10 ячеек) или в относительных величинах:  $a/S = 0,12; 0,3; 0,42$  и  $0,60$ .

### 3. Анализ результатов вычислительного эксперимента при наличии одного локального дефекта

Для определения частот и форм колебаний использован метод модального анализа, входящий в вычислительный комплекс SCAD [7]. Последовательность проводимого машинного эксперимента при наличии одного локального дефекта была такой.

Начиная с  $h/l = 0,15$  ( $h = 0,5$  м), последовательно, при дефекте с  $a/S = 0,15$  ( $a = 4$  см) из расчетной сетки конечных элементов убиралось 4 конечных элемента, и выполнялся модальный анализ, при котором на печать выдавались значения частот и ординат форм колебаний. Затем для перехода к следующему разме-

ру дефекта (увеличенного) ( $a/S = 0,3$ ) на этой же высоте из расчетной схемы исключалось уже 25 конечных элементов, и выполнялся модальный анализ для определения частот и форм колебаний. Точно так же последовательно, исключая из расчетной схемы 49 и 100 конечных элементов, выполнялся модальный анализ для  $a/S = 0,42$  и  $a/S = 0,60$ .

Описанный выше процесс расчета с одиночным дефектами на высоте  $h/l = 0,15$  полностью повторялся и при расположении дефектов на отметках  $h/l = 0,3; 0,45; 0,6; 0,75$  и  $0,9$ . Полученные значения частот собственных колебаний сведены в табл. 4. В ней приведены значения отношения полученных частот с локальным дефектом к частотам в гладкой (без дефектов) трубе-оболочке.

В процессе выполнения машинного эксперимента на печать выдавались все формы колебаний при каждом локальном дефекте. Для примера на рис. 4 приведе-

Таблица 4

Значения отношения полученных частот с локальным дефектом к частотам в гладкой (без дефектов) трубе-оболочке

Относительная отметка, где расположен дефект $h/l$	Значение частоты с дефектом ( $\omega_i$ ) и ее отношение к соответствующей частоте без дефектов ( $\omega_i/\omega_{i0}$ ) в зависимости от относительного размера дефекта ( $a/S$ )							
	$a/S = 0,12$		$a/S = 0,3$		$a/S = 0,42$		$a/S = 0,60$	
	$\omega_i$ (Гц)	$\omega_i/\omega_{i0}$	$\omega_i$ (Гц)	$\omega_i/\omega_{i0}$	$\omega_i$ (Гц)	$\omega_i/\omega_{i0}$	$\omega_i$ (Гц)	$\omega_i/\omega_{i0}$
$i = 1 \quad \omega_{10} = 10,02$ Гц (I форма поперечных колебаний)								
0,15	9,90	0,99	8,84	0,88	7,27	0,73	<b>4,11 (*)</b>	<b>0,41</b>
0,30	9,95	0,945	9,26	0,93	8,12	0,81	5,08	0,51
0,45	9,99	1,00	9,66	0,97	8,99	0,90	6,55	0,66
0,60	10,02	1,00	9,93	0,99	9,71	0,97	8,32	0,83
0,75	10,03	1,00	10,07	1,00	10,09	1,00	10,06	1,00
0,90	10,04	1,00	10,16	1,02	10,30	1,03	10,596	1,06
$i = 2 \quad \omega_{20} = 62,11$ Гц (II форма поперечных колебаний)								
0,15	62,03	1,00	60,91	0,98	56,96	0,92	30,14	0,485
0,30	62,03	1,00	60,89	0,98	58,29	0,94	54,60	0,88
0,45	61,67	0,99	57,05	0,92	50,84	0,82	40,16	0,65
0,60	61,64	0,99	56,56	0,91	48,98	0,79	33,80	0,54
0,75	61,92	0,999	59,60	0,96	54,90	0,88	45,00	0,725
0,90	62,17	1,00	62,39	1,00	62,50	1,00	60,87	0,98
$i = 3 \quad \omega_{30} = 171,09$ Гц (III форма поперечных колебаний)								
0,15	170,96	0,990	170,64	0,997	167,94	0,98	150,92	0,882
0,30	170,06	0,995	160,03	0,935	148,96	0,87	135,29	0,79
0,45	170,96	0,999	169,50	0,99	166,08	0,97	151,33	0,885
0,60	170,21	0,995	162,28	0,948	152,48	0,894	137,15	0,80
0,75	169,65	0,992	154,88	0,90	136,16	0,796	117,13	0,685
0,90	171,08	1,00	169,64	0,99	164,99	0,964	130,40	0,762
$i = 4 \quad \omega_{40} = 327,74$ Гц (IV форма поперечных колебаний)								
0,15	326,90	0,997	315,67	0,963	295,12	0,900	256,71	0,78
0,30	327,22	1,00	321,26	0,98	309,35	0,940	268,15	0,82

Относительная отметка, где расположен дефект $h/l$	Значение частоты с дефектом ( $\omega_i$ ) и ее отношение к соответствующей частоте без дефектов ( $\omega_i/\omega_{i0}$ ) в зависимости от относительного размера дефекта ( $a/S$ )							
	$a/S = 0,12$		$a/S = 0,3$		$a/S = 0,42$		$a/S = 0,60$	
	$\omega_i$ (Гц)	$\omega_i/\omega_{i0}$	$\omega_i$ (Гц)	$\omega_i/\omega_{i0}$	$\omega_i$ (Гц)	$\omega_i/\omega_{i0}$	$\omega_i$ (Гц)	$\omega_i/\omega_{i0}$
0,45	325,78	0,994	306,69	0,935	284,50	0,870	251,70	0,77
0,60	327,23	0,998	323,00	0,986	311,06	0,950	<b>263,70</b>	<b>0,805</b>
0,75	325,28	0,993	305,56	0,93	287,43	0,880	<b>265,20</b>	<b>0,81</b>
0,90	327,20	0,998	317,98	0,97	<b>294,26</b>	<b>0,898</b>	<b>231,66</b>	<b>0,707</b>
$i = 5 \quad \omega_{50} = 527,74$ Гц (V форма поперечных колебаний)								
0,15	524,56	0,995	509,02	0,97	503,77	0,960	<b>506,24</b>	<b>0,98</b>
0,30	525,92	0,998	504,42	0,96	495,81	0,940	<b>439,39</b>	<b>0,834</b>
0,45	526,06	0,998	515,90	0,98	496,40	0,940	<b>422,12</b>	<b>0,80</b>
0,60	523,60	0,994	498,99	0,95	485,40	0,920	<b>484,50</b>	<b>0,92</b>
0,75	526,00	0,998	517,06	0,98	<b>491,38</b>	<b>0,940</b>	<b>424,70</b>	<b>0,80</b>
0,90	525,26	0,995	498,84	0,95	<b>459,23</b>	<b>0,860</b>	<b>419,66</b>	<b>0,795</b>
$i = 6 \quad \omega_{60} = 762,76$ Гц (VI форма поперечных колебаний)								
0,15	759,65	0,996	739,72	0,97	<b>725,13</b>	<b>0,95</b>	<b>681,57</b>	<b>0,89</b>
0,30	758,16	0,99	727,30	0,95	<b>753,29</b>	<b>1,00</b>	<b>714,93</b>	<b>0,94</b>
0,45	762,29	1,00	737,54	0,97	<b>706,52</b>	<b>0,93</b>	<b>650,98</b>	<b>0,85</b>
0,60	761,50	0,998	750,90	0,98	<b>702,65</b>	<b>0,92</b>	<b>566,28</b>	<b>0,74</b>
0,75	760,27	0,997	750,63	0,984	<b>700,74</b>	<b>0,92</b>	<b>629,04</b>	<b>0,82</b>
0,90	759,57	0,99	<b>709,06</b>	<b>0,93</b>	<b>660,12</b>	<b>0,86</b>	<b>571,49</b>	<b>0,75</b>
$i_{кр} = 1 \quad \omega_{10}^{кр} = 237,65$ Гц (I форма крутильных колебаний)								
0,15	234,76	0,99	188,06	0,79	102,6	0,43	69,32	0,29
0,30	235,26	0,99	169,13	0,71	103,47	0,435	68,38	0,29
0,45	236,03	0,99	191,39	0,80	103,33	0,435	57,42	0,24
0,60	236,83	0,997	199,24	0,84	118,04	0,497	56,43	0,24
0,75	237,50	0,999	218,00	0,92	172,57	0,73	159,40	0,67
0,90	237,93	1,00	236,74	0,996	219,95	0,93	185,84	0,78
$i_{кр} = 2 \quad \omega_{20}^{кр} = 712,93$ Гц (II форма крутильных колебаний)								
0,15	707,92	0,993	619	0,87	578,29	0,81	572,69	0,8
0,30	713,74	1,00	711,30	1,00	704,95	0,99	706,06	0,99
0,45	710,58	0,997	621,28	0,87	588,28	0,83	572,82	0,80
0,60	703,74	0,99	503,72	0,71	438,10	0,61	420,70	0,59
0,75	704,63	0,99	561,36	0,79	545,75	0,77	529,63	0,74
0,90	712,24	1,00	607,10	0,85	555,19	0,78	504,95	0,71
$i_{прод} = 1 \quad \omega_{10}^{прод} = 389,54$ Гц (I форма продольных колебаний)								
0,15	387,78	0,995	372,95	0,96	358,63	0,92	332,77	0,85
0,30	388,17	0,997	374,90	0,96	359,78	0,92	323,14	0,83
0,45	388,74	0,998	381,72	0,98	375,40	0,96	356,70	0,92
0,60	389,27	1,00	383,56	0,985	373,99	0,96	352,10	0,90
0,75	389,77	1,00	390,35	1,00	391,38	1,00	393,90	1,01
0,90	390,06	1,00	392,41	1,00	394,09	1,04	385,46	1,01

(\*) Курсивом выделено пороговое значение частоты.

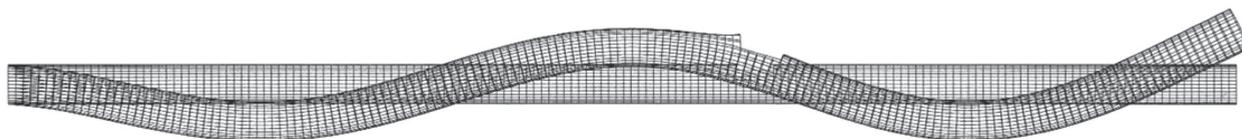


Рис. 4. Отверстие на отметке 2 м. Размер отверстия 10×10 см. Частота  $\omega = 323,06$  Гц. (4-я форма поперечных колебаний)

на 4-я форма поперечных колебаний трубы-оболочки с локальным дефектом размером 10×10 см ( $a/S = 0,3$ ), расположенным на высоте 2 м от заземления ( $h/l = 0,6$ ).

При анализе изменения основной (первой) частоты поперечных колебаний в зависимости от высоты расположения одиночного дефекта и его размера (рис. 5) обнаружено следующее. Как и следовало ожидать, наибольшее снижение этой частоты ( $1/10 = 0,41$ ) произошло при расположении самого большого дефекта ( $a/S = 0,6$ ) в самой нижней части трубы-оболочки ( $h/l = 0,15$ ). Кроме того, оказалось, что при расположении любого дефекта на отметках  $h/l = 0,75$  и  $0,9$  основная (первая) частота поперечных колебаний практически не изменяется. Не изменяется частота и при самом малом дефекте ( $a/S = 0,12$ ), находящемся на любой высоте. При остальных значениях размера дефекта и высоты его расположения происходит достаточно плавное изменение первой частоты от максимального значения к минимальному при увеличении дефекта и приближении его к заземлению (рис. 5).

Анализ изменения второй частоты поперечных колебаний (рис. 5) показывает, что эти изменения существенно отличаются от изменения первой (ос-

новной частоты) в зависимости от размера дефекта и высоты его расположения, хотя наибольшее снижение этой частоты ( $\omega_2/\omega_{20} = 0,485$ ) наблюдается при самом большом размере дефекта ( $a/S = 0,6$ ), расположенного ближе всего к заземлению ( $h/l = 0,15$ ). Но в отличие от первой частоты в этом случае поверхность, описывающая изменение частоты, не плавная, а имеет гребень (при  $h/l = 0,3$ ) и впадину (при  $h/l = 0,6$ ) (рис. 6).

Анализ изменения третьей частоты поперечных колебаний (рис. 7) показывает, что наибольшее снижение этой частоты ( $\omega_3/\omega_{30} = 0,685$ ) наблюдается при самом большом дефекте ( $a/S = 0,60$ ), когда он расположен на отметке  $h/l = 0,75$ . В этом случае поверхность изменения 3-й частоты (рис. 7) в зависимости от размера и места расположения дефекта представляет собой складчатую структуру с более плавными изменениями от гребней к впадинам, чем у 2-й формы (см. рис. 6).

Анализ изменения четвертой, пятой и шестой форм колебаний показывает, что влияние высоты расположения и размера отверстия существенно меньше, чем для первых трех форм колебаний. Исключение составляет отверстие размером  $a/S = 0,60$ ,

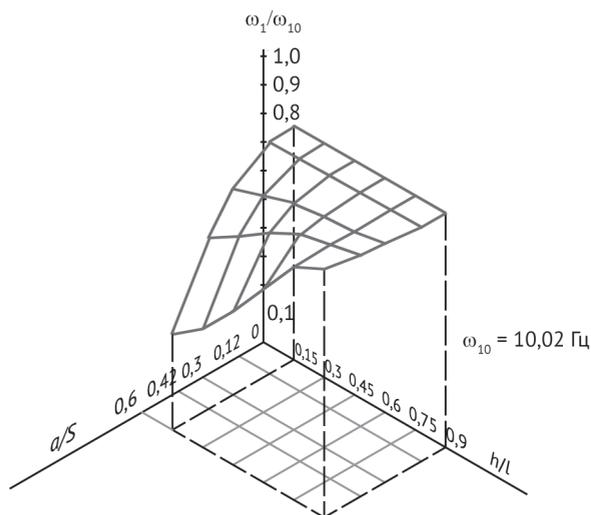


Рис. 5. Изменение основной (первой) частоты поперечных колебаний в зависимости от размера ( $a/S$ ) и высоты расположения одиночного отверстия  $h/l$

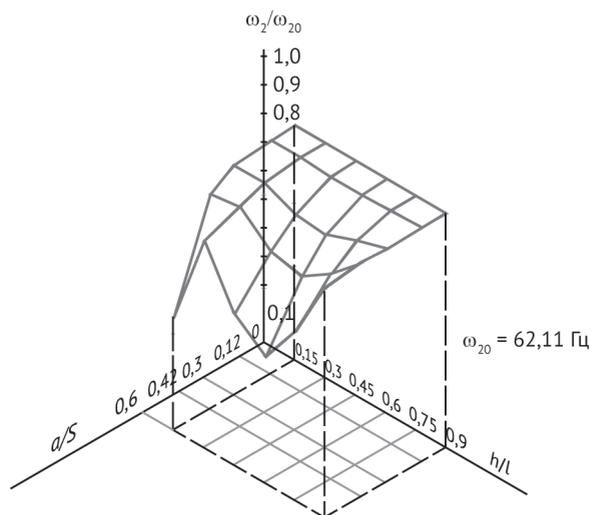


Рис. 6. Изменение второй частоты поперечных колебаний в зависимости от размера ( $a/S$ ) и высоты расположения одиночного отверстия  $h/l$

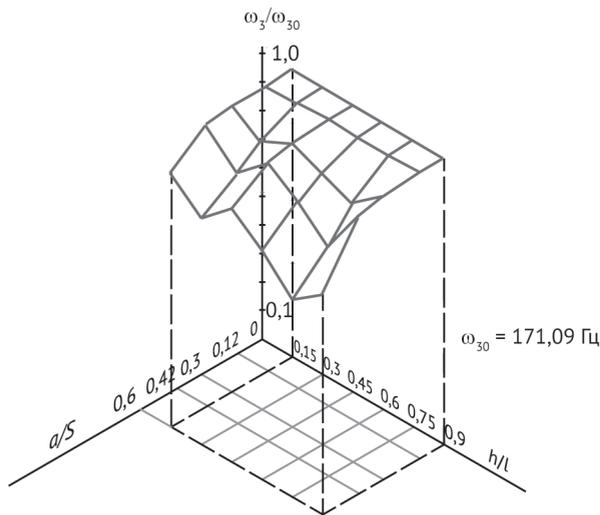


Рис. 7. Изменение третьей частоты поперечных колебаний в зависимости от размера ( $a/S$ ) и высоты расположения одиночного отверстия  $h/l$

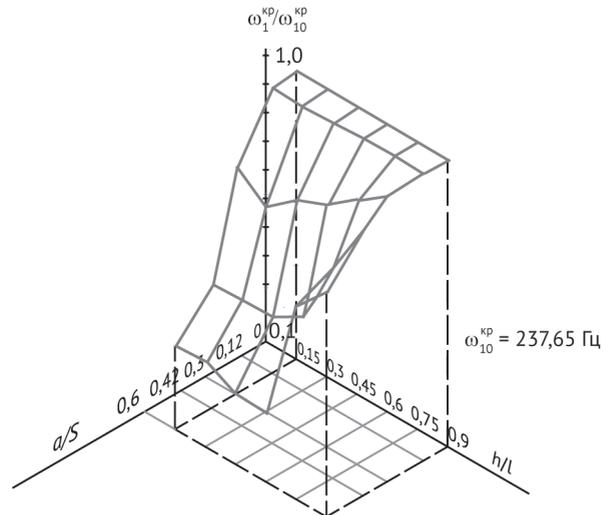


Рис. 8. Изменение первой крутильной частоты в зависимости от размера ( $a/S$ ) и высоты расположения одиночного отверстия  $h/l$

которое уменьшает четвертую частоту до значения  $\omega_4/\omega_{40}=0,77$ , находясь на отметке  $h/l=0,45$ .

В целом анализ изменения частот поперечных колебаний показывает, что во всех случаях отверстие размером  $a/S=0,12$  практически не влияет на изменение частот и их форм. Характер изменения третьей, четвертой и пятой частот показывает, что, как и следовало ожидать, при расположении отверстия любого размера (кроме  $a/S=0,12$ ) на отметках, равных или близких к отметкам узловых точек соответствующих форм колебания, снижение всех частот менее существенно, чем при расположении отверстий на отметках, близких к отметкам с экстремальными значениями в соответствующих формах колебаний.

Анализ изменения первой частоты крутильных колебаний (рис. 8) в зависимости от размера и высоты расположения дефекта показывает, что в исследуемом диапазоне этих изменений крутильная частота имеет более существенное снижение ( $\omega_1^{kp}/\omega_{10}^{kp}=0,24$ ) по сравнению с 1-й частотой поперечных колебаний ( $\omega_1/\omega_{10}=0,41$ ). Кроме того, практически на любой высоте от  $h/l=0,15$  до  $h/l=0,6$  характер изменения 1-й крутильной частоты в зависимости от размера дефекта остается постоянным (рис. 8).

При подъеме отверстия на отметку  $h/l=0,75$  крутильная частота увеличивается и на отметке  $h/l=0,9$  незначительно отличается от частоты для трубы без дефектов. Исключение составляет только наличие большого отверстия, а именно при  $a/S=0,60$   $\omega_1^{kp}/\omega_{10}^{kp}=0,78$ .

Совершенно иначе ведет себя вторая частота крутильных колебаний (рис. 9). Имея незначительное снижение частоты при расположении отверстия любых размеров на отметке  $h/l=0,15$ , при подъеме от-

верстия на отметку  $h/l=0,3$  частота полностью восстанавливается и для всех размеров становится равной частоте крутильных колебаний трубы без дефектов.

Дальнейший подъем отверстий по высоте трубы до отметки  $h/l=0,6$  приводит к более существенному снижению частоты, чем в случае  $h/l=0,15$ . Так, отверстие  $a/S=0,60$  дает снижение до значения  $\omega_1^{kp}/\omega_{10}^{kp}=0,59$ . Расположение отверстий на отметках  $h/l=0,75$  и  $h/l=0,9$  приводит к некоторому увеличению второй частоты, например при  $h/l=0,9$  для  $a/S=0,60$   $\omega_1^{kp}/\omega_{10}^{kp}=0,71$ .

В целом анализ крутильных колебаний показал, что, во-первых, значение первой частоты этих колебаний более интенсивно снижается, чем первая ча-

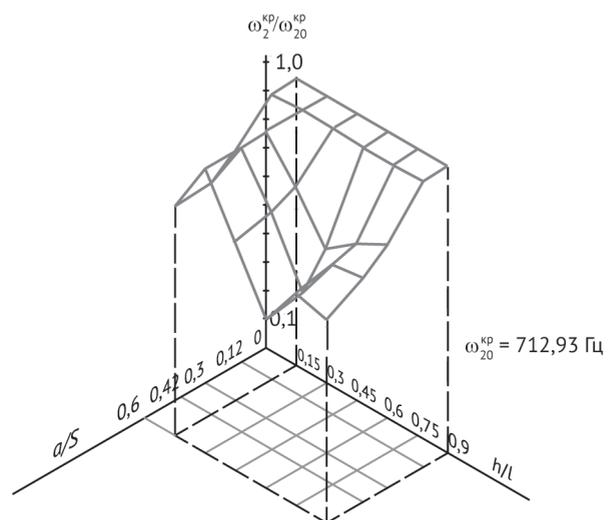


Рис. 9. Изменение второй крутильной частоты в зависимости от размера ( $a/S$ ) и высоты расположения одиночного отверстия ( $h/l$ )

стота поперечных колебаний. Во-вторых, характер изменения второй крутильной частоты показывает, что в отличие от поперечных колебаний, здесь максимальное снижение частоты происходит при расположении дефекта в районе узловой точки второй формы крутильных колебаний, а минимальное снижение – при расположении дефекта в точке формы с максимальной амплитудой в первой полуволне, т. е. наоборот, чем при поперечных колебаниях.

Анализ результатов изменения первой частоты продольных колебаний трубы-оболочки с отверстиями разных размеров и на различных высотах (табл. 4) показал, что она меняется незначительно (максимальное снижение составило 0,83 для отверстия  $a/S = 0,60$  на отметке  $h/l = 0,3$ ). Расположение любого отверстия на высоте  $h/l = 0,75$  или  $h/l = 0,9$  почти не влияет на частоту продольных колебаний.

В целом проведенный анализ изменения всех поперечных, крутильных и продольных частот в зависимости от размера отверстия при расположении последнего на разных отметках показывает, что наиболее интенсивно уменьшается, как правило, первая крутильная частота при высоте расположения отверстия на отметках от  $h/l = 0,15$  до  $h/l = 0,6$  для всех размеров отверстия. Более высокое расположение отверстия не дает таких преимуществ крутильным колебаниям по сравнению с поперечными.

#### 4. Анализ результатов вычислительного эксперимента при наличии одновременно двух и трех локальных дефектов

При наличии одновременно двух отверстий на отметках  $h_1/l = 0,3$  и  $h_2/l = 0,6$  (табл. 5 и рис.10, с. 3 обложки) изменение поперечных частот показывает, что частоты можно разделить на две группы. К первой группе можно отнести первую, вторую и третью частоты, которые имеют почти одинаковый закон уменьшения при возрастании размера отверстия. Ко второй группе относятся четвертая, пятая и шестая частоты, которые также имеют одинаковый закон уменьшения частот, но в этом случае скорость уменьшения несколько меньше, чем в первой группе. Изменение крутильных колебаний при двух отверстиях на этих отметках ближе всего к изменениям этих колебаний при одном отверстии на высоте  $h/l = 0,45$ . При этом несколько увеличивается интенсивность снижения второй крутильной и продольной частот, а изменение первой крутильной частоты приближается к линейному в зависимости от размера отверстия.

Если разместить одновременно два отверстия на отметках  $h_1/l = 0,45$  и  $h_2/l = 0,9$  (табл. 5 и рис. 11, с. 3 обложки), то поперечные частоты опять можно разделить на две группы. Но теперь в первую группу входят первая и третья частота, а во вторую все остальные частоты, включая и вторую. Только теперь

Таблица 5

Значение частоты с дефектом и её отношение к соответствующей частоте без дефекта

$\omega_0$ (Гц)	$a/S = 0,12$		$a/S = 0,3$		$a/S = 0,42$		$a/S = 0,60$	
	$\omega_i$ (Гц)	$\omega_i/\omega_0$						
Два дефекта на относительных отметках: $h_1/l = 0,3$ и $h_2/l = 0,6$								
$\omega_{10} = 10,02$	9,95	0,99	9,18	0,92	7,92	0,79	4,82	0,481
$\omega_{20} = 62,11$	61,57	0,99	56,08	0,9	48,74	0,78	32,16	0,52
$\omega_{30} = 171,09$	169,17	0,99	150,34	0,88	127,54	0,75	95,38	0,56
$\omega_{40} = 327,74$	326,99	0,998	316,83	0,97	296,92	0,9	227,47	0,694
$\omega_{50} = 527,02$	522,9	0,992	490,01	0,93	451,35	0,86	348,68	0,66
$\omega_{60} = 762,02$	761,65	0,998	717,16	0,94	668,85	0,88	529,92	0,695
$\omega_{10}^{кр} = 237,65$	234,49	0,987	154,31	0,65	88,76	0,373	30,795	0,13
$\omega_{20}^{кр} = 712,93$	704,39	0,99	520,54	0,73	506	0,71	480,02	0,67
$\omega_{10}^{прод} = 389,54$	387,89	0,996	368,56	0,95	334,32	0,88	302,5	0,78
Два дефекта на относительных отметках: $h_1/l = 0,45$ и $h_2/l = 0,9$								
$\omega_{10} = 10,02$	10,01	0,999	9,81	0,98	9,3	0,93	7,01	0,70
$\omega_{20} = 62,11$	61,72	0,995	57,19	0,92	50,54	0,82	40,31	0,65
$\omega_{30} = 171,09$	170,96	0,999	168,25	0,98	160,49	0,94	118,75	0,69
$\omega_{40} = 327,74$	325,25	0,992	299,38	0,91	267,49	0,82	198,94	0,61
$\omega_{50} = 527,02$	524,28	0,995	488,30	0,93	441,5	0,84	288,34	0,55
$\omega_{60} = 762,02$	756,65	0,99	693,38	0,91	619,57	0,81	467,26	0,61
$\omega_{10}^{кр} = 237,65$	236,31	0,995	189,30	0,796	104,36	0,44	39,55	0,17
$\omega_{20}^{кр} = 712,93$	710,12	0,996	575,13	0,91	594,96	0,83	458,48	0,64
$\omega_{10}^{прод} = 389,54$	389,24	0,999	382,46	0,98	359,25	0,92	317,26	0,81

Таблица 6

Значение частоты с дефектом и её отношение к соответствующей частоте без дефекта

$\omega_{i_0}$ (Гц)	$a/S = 0,12$		$a/S = 0,3$		$a/S = 0,42$		$a/S = 0,60$	
	$\omega_i$ (Гц)	$\omega_i/\omega_{i_0}$						
Три дефекта на относительных отметках: $h_1/l = 0,3$ , $h_2/l = 0,6$ и $h_3/l = 0,9$								
$\omega_{10} = 10,02$	9,97	0,995	9,31	0,93	8,17	0,82	5,15	0,51
$\omega_{20} = 62,11$	61,63	0,993	56,34	0,91	49,13	0,79	32,56	0,52
$\omega_{30} = 171,09$	169,13	0,93	149,65	0,87	126,36	0,74	93,25	0,545
$\omega_{40} = 327,74$	326,44	0,996	30,594	0,933	263,75	0,805	156,18	0,48
$\omega_{50} = 527,02$	521,18	0,99	469,15	0,89	406,56	0,77	264,66	0,50
$\omega_{60} = 762,02$	754,40	0,99	672,43	0,88	572,38	0,75	385,16	0,505
$\omega_{1_0}^{sp} = 237,65$	234,77	0,99	155,15	0,65	89,77	0,38	31,46	0,13
$\omega_{2_0}^{sp} = 712,93$	703,40	0,99	519,29	0,73	468,24	0,66	378,54	0,53
$\omega_{3_0}^{prod} = 389,54$	388,41	0,997	371,63	0,954	347,95	0,893	321,60	0,826

наоборот – скорость уменьшения частот в первой группе меньше, чем во второй группе. Изменение крутильных и продольных частот мало отличается от изменения этих частот для отверстий на отметке  $h/l = 0,3$  и  $h/l = 0,6$ .

Если в трубе-оболочке сделать три отверстия на отметках  $h_1/l = 0,3$ ;  $h_2/l = 0,6$  и  $h_3/l = 0,9$  (табл. 6 и рис. 12, с. 3 обложки), т. е. разместить дефекты более или менее равномерно по длине трубы, то полученные результаты по частотам поперечных колебаний показывают, что все шесть частот изменяются практически одинаково или пропорционально. Заметим, что такой случай является исключением из всех ранее рассмотренных. Характер изменения первой крутильной частоты в зависимости от размера отверстия в этом случае мало отличается от изменения этой частоты в первых двух рассмотренных случаях, но становится еще более линейным. При этом вторая крутильная частота в отличие от поперечных частот имеет меньшую скорость убывания по сравнению с первой частотой крутильных колебаний. Изменение продольной частоты в этом случае незначительно отличается от ее изменения в первых двух случаях.

## 5. Выводы

Анализ всех результатов проведенного вычислительного эксперимента показал, что хотя решалась пространственная задача в упругой постановке, большинство частот поперечных и крутильных собственных колебаний в зависимости от размера дефекта и места его расположения по высоте трубы-оболочки меняются нелинейно. Такую нелинейность, которая не является ни физической, ни геометрической, можно было бы отнести к конструкционной, но учитывая, что труба представляет собой сравнительно простую конструкцию, по-видимому, эту нелинейность следует считать генетической.

Во всех вариантах расчета при вычислительном эксперименте — кроме случая, когда одновременно рассматривались три локальных дефекта, — все частоты в зависимости от размера по высоте трубы менялись существенно непропорционально. В связи с этим, по-видимому, необходимо уточнить некоторые положения, высказанные как рекомендации при расчете конструкций на гармонические нагрузки. Например, в [1] сказано, что «...определенный в результате расчета спектр частот собственных колебаний может лишь сдвигаться в ту или иную сторону в пределах расширенных частотных зон. Одна из частот совмещается с частотой вынужденных колебаний или максимально приближается к ней, а все остальные изменяются пропорционально». При наличии в конструкции локальных местных дефектов такое предположение, как вытекает из проведенного вычислительного эксперимента, может внести существенную ошибку в расчеты.

Одним из интересных результатов выполненного вычислительного эксперимента является тот факт, что при определенном расположении локального дефекта первая частота крутильных собственных колебаний трубы уменьшается существенно интенсивнее, чем первая и тем более другие частоты поперечных колебаний. В связи с этим вызывает удивление тот факт, что в настоящее время никакими нормами не предусмотрен расчет или проверка, в частности, металлических дымовых труб на крутильные колебания. Косвенным подтверждением того, что такие трубы могут испытывать крутильные колебания, являются результаты обследования анкерных креплений одной из труб, находящихся в эксплуатации. Оказалось, что все анкеры имеют наклон в одну сторону по окружности, причем этот наклон совпадает с результатами наблюдения за изменением отклонения верха трубы по азимуту.

Такое отношение к крутильным колебаниям в настоящее время удивляет, поскольку еще в 1961 г. были опубликованы данные по измерению частот собственных колебаний реальных зданий, которые, в частности, показали, что период крутильных колебаний относительно вертикальной оси здания составляет около  $2/3$  периода основной формы изгибных или сдвиговых колебаний [8]. Кроме того, в опубликованной в 1969 г. работе сказано: «В последние годы все большее внимание привлекают вопросы расчета зданий с учетом крутильных колебаний» [3].

Характер изменения частот собственных колебаний в зависимости от размера дефекта и места его расположения показывает, что, если постоянно вести наблюдение за реальной строительной конструкцией, например, дымовой металлической трубой, используя ту или иную аппаратуру для регулярного измерения частот собственных колебаний (например, типа «Стрела-2»), то можно по характеру изменения этих частот прогнозировать появление дефектов и их разрастание. Например, если в процессе мониторинга обнаружено, что начинает более существенно уменьшаться первая частота по сравнению с другими, то, по-видимому, появился или развивается какой-либо дефект в нижней части трубы. Если начинает сильно уменьшаться третья частота, а первая при этом практически не изменяется, то, по-видимому, появился дефект в верхней части трубы. И, наконец, если существенно изменяется вторая частота, то это признак того, что появился дефект в средней части трубы.

Описанный выше сценарий, конечно, является лишь первой попыткой решить сложную задачу – по характеру изменения частот собственных колебаний

оценить масштабы и степень повреждений в реальных конструкциях зданий и сооружений.

Не менее важной и сложной проблемой является установление для находящихся в эксплуатации строительных конструкций пороговых значений частоты (или частот), которые соответствовали бы, например, наступлению первого, второго или третьего предельного состояния конструкций. По-видимому, результаты, полученные в ходе выполненного вычислительного эксперимента, где пороговые значения частот собственных колебаний определялись при рассмотрении простейшей пространственной упругой системы с отверстиями, не могут быть распространены на реальные конструкции, так как в эксперименте в качестве пороговой принималась частота, при которой соответствующая ей форма собственных колебаний резко искажалась и становилась нереальной. Несмотря на это, приведем их (см. табл. 4, 5 и 6):

- среднее приведенное пороговое значение первой частоты поперечных колебаний – 0,526;
- то же с учетом первой частоты крутильных колебаний — 0,346.

Для сравнения дадим среднее значение относительного изменения частот при натуральных испытаниях, о которых говорилось в предисловии:

- среднее значение отношения (2)/(1) по данным табл. 1 — 0,512;
- среднее значение отношения (4)/(1) по данным табл. 2 — 0,369.

Учитывая, что сравниваются абсолютно разные объекты и методы исследования, такое совпадение результатов представляется удивительным и пока трудно объяснимым.

## Литература

1. Справочник по динамике сооружений / Под ред. Б.Г. Коренева, И. М. Рабиновича. — М., Стройиздат, 1972.
2. Блум Дж. Определение периодов и другие сейсмические исследования в 15-этажном здании // Международная конференция по сейсмическому строительству в Сан-Франциско. — М., 1961. — С. 115–141.
3. Поляков С.В. Сейсмостойкие конструкции зданий. М.: Высшая школа, 1969.
4. Сейсмостойкие сооружения за рубежом / Под общей ред. В. И. Насонова. М., 1968.
5. Хисада Т., Накагава К. Вибрационные испытания различных типов специальных конструкций вплоть до разрушения // Международная конференция по сейс-

- мостойкому строительству в Сан-Франциско. — М., 1961. — С. 60–71.
6. Справочник по сопротивлению материалов / Под ред. Г. С. Писаренко. — Киев: Наукова думка, 1988.
7. Карниловский В. С., Криксунов Э. З., Маляренко А. А., Перельмутер А. В., Перельмутер Н. А. Вычислительный комплекс SCAD, 2004 г.
8. Кавасуми Х., Канаи К. Колебания реальных зданий с малыми амплитудами // Международная конференция по сейсмостойкому строительству в Сан-Франциско. — М., 1961. — С. 46–59.
9. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможности их анализа. — Киев: ВПП «Компас», 2001.

## References

1. Handbook on Structural Dynamics. Ed. by B.G. Korenev, I.M. Rabinovich. M., Stroiizdat, 1972, 511 p (in Russian).
2. Blume J. Vibration Periods of a 15-story Building. In the Collection of Articles of the San Francisco World Conference

- on Earthquake Engineering, M., State Publishing House of Construction, Architecture and Construction Materials Literature, 1961, pp. 115–141 (in Russian).
3. Polyakov S.V. Seismic Structures of Buildings. M. Vyshaya Shkola, 1969, 336 p (in Russian).
  4. Seismic Structures Abroad. General ed. by V. I. Nasonov. M., Construction Literature Publishing House. 1968, 223 p (in Russian).
  5. Hisada T., Nakagawa K. Vibration Tests on Various Types of Building Structures up to Failure. In the Collection of Articles of the San Francisco World Conference on Earthquake Engineering. M., State Publishing House of Construction, Architecture and Construction Materials Literature, 1961, pp. 60–71 (in Russian).
  6. Handbook on Resistance of Materials. Ed. by G.S. Pisarenko, Kiev. Naukova Dumka. 1988, 735 p (in Russian).
  7. Karnilovsky V. S., Kriksunov. E.Z., Malyarenko, A.A., Perelmutter A.V., Perelmutter N.A. SCAD Computing System, 2004, 592 p (in Russian).
  8. Kawasumi H., Kanai K. Small Amplitude Vibrations of Actual Buildings. In the Collection of Articles of the San Francisco World Conference on Earthquake Engineering. — M., State Publishing House of Construction, Architecture and Construction Materials Literature, 1961, pp. 46–59 (in Russian).
  9. Perelmutter A.V. Design Models of Structures and Opportunities of Their Analysis. / Perelmutter A.V., Slivker, V. I. — Kiev: VPP Kompas, 2001, 448 p.: Illustrated (in Russian).

## Change in the Natural Vibration Frequency Spectrum of the Steel Pipe Mathematic Model Depending on Sizes, Location, and Number of Local Defects

**S.P. Sushchyov**, General Director, Doctor of Engineering, Professor, Center of Researches of Extreme Situations, Moscow  
**V.V. Samarin**, Senior Specialist, Doctor of Engineering, Professor, Center of Researches of Extreme Situations, Moscow  
**A.A. Suslonov**, Department Head, Doctor of Engineering, Center of Researches of Extreme Situations, Moscow  
**A.M. Novgorodova**, Senior Engineer, Center of Researches of Extreme Situations, Moscow

### Abstract

*The article discusses issues related to the research of the influence of sizes and location of local defects on the change in the natural vibration frequencies spectrum of the steel pipe model fixed on a single threshold. The research was made using the finite element analysis (FEA) and the SCAD computing system. Nonlinear dependence of the natural vibration frequencies on the defect size and its location was ascertained. Such nonlinearity in the course of defects accumulation is classified as a genetic nonlinearity. Completed research reveals that the scale and the location of defects can be determined by the pattern of their change during the monitoring of main dynamic characteristics in the course of the building operation. It has been ascertained that the first frequency of torsional natural vibrations of the pipe declines with greater intensity than the first and other lateral vibration frequencies in case of a specific location of a growing local defect. There have been no regulatory requirements for the time being to the analysis of structures (flue stacks) subject to torsional vibrations. However, for example, it was ascertained during the expert examination of anchoring of a steel pipe in service and having vertical stiffeners throughout the height that all the anchors damaged circumferentially have an inclination to one and the same side. Furthermore, the value of such an inclination coincides with results of observations of the pipe top deviation change in azimuth.*

*An attempt was made during the research to determine the limit value of frequencies that would correspond to occurrence of the first, the second or the third limit states of operated construction structures with defects.*

**Keywords:** defect, natural vibration frequency, frequency spectrum, genetic nonlinearity, vibrations, monitoring, limit state, threshold value, facilities, defect, damage.

### Поддержка молодых ученых и ведущих научных школ Российской Федерации

Гранты Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых кандидатов и докторов наук, а также ведущих научных школ: ежегодно осуществляется адресная поддержка 400 молодых (до 35 лет) российских ученых — кандидатов наук (по 600 тыс. рублей в год), 60 молодых (до 40 лет) российских ученых — докторов наук (по 1 млн рублей в год) и ведущих научных школ Российской Федерации (по 400 тыс. рублей в год).

Стипендии Президента Российской Федерации устанавливаются в размере 20 тыс. рублей каждая и назначаются на срок до трех лет.

Общее число лиц, ежегодно получающих стипендию Президента РФ, составляет 1000 человек.

Общий объем финансирования стипендий составляет 240 млн рублей ежегодно. Назначение грантов и стипендий осуществляется на основании конкурсных процедур.