

¹ А. И. Айнабеков, д-р техн. наук
¹ У. С. Сулейменов, д-р техн. наук
² К. В. Аврамов, д-р техн. наук
¹ А. Б. Молдагалиев, канд. техн. наук
¹ М. А. Камбаров, канд. техн. наук
¹ Т. Т. Серикбаев, канд. техн. наук
¹ Х. А. Абшенов, канд. техн. наук

¹ Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауэзова,
 г. Шимкент, e-mail: dinamika-nauka@rambler.ru
² Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины,
 г. Харьков, e-mail: kvavr@kharkov.ua

Ключові слова: попередньо напружений трубопровід, експериментальний аналіз коливань, вільні затухаючі коливання, вимушені коливання.

УДК 621.7.023

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Наведено дані експериментального аналізу коливань моделей попередньо напружених трубопроводів при динамічних навантаженнях. Експериментально досліджено вплив намотки проволочки на статичну міцність та динамічні характеристики магістральних трубопроводів. Експериментально обґрунтовано, що намотування проволочки на трубопровід може використовуватися як засіб сейсмічного захисту конструкції.

Введение

Поскольку проектирование, строительство и эксплуатация трубопроводов сопряжены с большими финансовыми затратами, опасностью загрязнения окружающей среды, развитие сети трубопроводов должно основываться на научных и экономически оправданных решениях. Современное состояние проектирования и строительства магистральных трубопроводов для нефти и газа характеризуется увеличением диаметра труб, рабочих давлений при транспортировке. Одним из эффективных методов совершенствования конструкции магистральных трубопроводов считается создание предварительных напряжений, что достигается навивкой высокопрочной проволоки, стекловолоконна или ленты на корпус труб перпендикулярно или под углом к образующей трубопровода [1, 2]. Тогда в стенках трубопровода создаются усилия, обратные по знаку с рабочими. В этом случае наблюдается перераспределение напряжений, что можно учесть при проектировании снижением толщины стенки и создании более прочной конструкции за счет выравнивания окружных и продольных напряжений [3, 4].

Способ создания предварительных напряжений широко применяется в сосудах и аппаратах высокого давления [5–7]. Однако анализ литературы свидетельствует, что применение предварительного напряжения в магистральных трубопроводах практически не изучено. Не исследованы свойства напряженно-деформированного состояния (НДС) таких конструкций под действием статических и динамических воздействий. Не изучены вопросы оптимального проектирования предварительно напряженных трубопроводов [8–10]. Существующие нормы расчета на прочность магистральных трубопроводов не регламентируют проектные расчеты предварительно напряженного трубопровода при статических и динамических нагрузках [11, 12].

Особо следует подчеркнуть, что не существует надежных методов расчета колебаний трубопроводов, усиленных намотанной на них проволокой. При наматывании проволоки существенно увеличивается коэффициент линейного демпфирования конструкции. Это увеличение практически не поддается надежным расчетам. Наматывание проволоки ужесточает конструкцию, что влияет на собственные частоты колебаний и на вид амплитудно-частотной характеристики. Подчеркнем, что на сегодняшний день не существует надежных методов расчета таких колебаний. Поэтому целью данной статьи является экспериментальный анализ свойств колебаний трубопровода с навитой проволокой. Обсуждаются результаты экспериментального анализа статики и динамики предварительно напряженных трубопроводов путем исследования уменьшенных моделей с учетом эксплуатационных

© А. И. Айнабеков, У. С. Сулейменов, К. В. Аврамов, А. Б. Молдагалиев,
 М. А. Камбаров, Т. Т. Серикбаев, Х. А. Абшенов, 2016

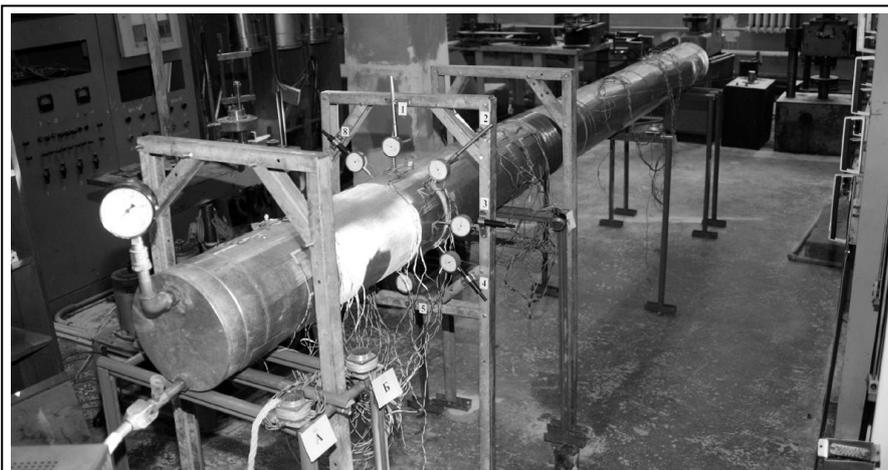


Рис. 1. Общая схема модели трубопровода

условий и различных параметров предварительного напряжения. В статье показано, что наматывание проволоки является способом сейсмической защиты трубопроводов.

1. Метод исследования

Экспериментальные исследования проводились на моделях наземных трубопроводов, выполненных из малоуглеродистой стали. Геометрические размеры трубопровода выбирались на основе подобия между моделью и натурной конструкцией.

Согласно этой теории между параметрами модели и натурной конструкции устанавливается постоянный масштаб. Масштаб моделирования принят 1:5 к натурным конструкциям трубопроводов диаметром 1220 мм. Общий вид модели представлен на рис. 1.

Для экспериментального анализа были изготовлены три модели трубопровода: А, Б, В. Модель А является базовой; в ней не создаются предварительные напряжения. В моделях Б и В для создания предварительных напряжений навивается проволока. В модели Б проволока навивается с шагом a , равным диаметру ($a = d$), а в модели В проволока навивается с шагом, равным трем диаметрам проволоки ($a = 3d$).

Модель представляет собой фрагмент прямолинейной части трубопровода длиной 3980 мм, состоящий из трех равных пролетов длиной 1260 мм и диаметром 245 мм. Фрагмент трубопровода уложен на опоры высотой 600 мм. Трубопровод с одной стороны жестко зашпемлен, а с другой – удерживается продольно-подвижной опорой. Эскиз модели трубопровода представлен на рис. 2. Все размеры показаны в мм. В средней части трубопровода установлены две свободно подвешенные опоры. Корпуса моделей изготовлены из стальных листов марки Ст8, а проволока обмотки из стали Ст15. Навивка обмотки на корпус модели производилась на специально сконструированной намоточной машине, которая позволяет натягивать проволоку с контролируемым усилием и одинаковым шагом по длине модели.

В качестве первичных преобразователей при измерении деформаций применяются одноэлементные тензорезисторы. Вторичной измерительной аппаратурой служил светолучевой осциллограф в комплекте с универсальным тензоусилителем и блоком питания. Измерение динамических перемещений осуществлялось тензорезисторным кольцевым преобразователем перемещений. Для возбуждения колебаний в конструкции использовался виброэлектродинамический стенд.

При проведении испытаний моделировались следующие нагрузки: а) нагрузка от веса транспортируемого продукта, которая имитировалась различным заполнением трубы водой (пустой, частично заполненный и полностью заполненный); б) нагрузка от внутреннего избыточного давления,

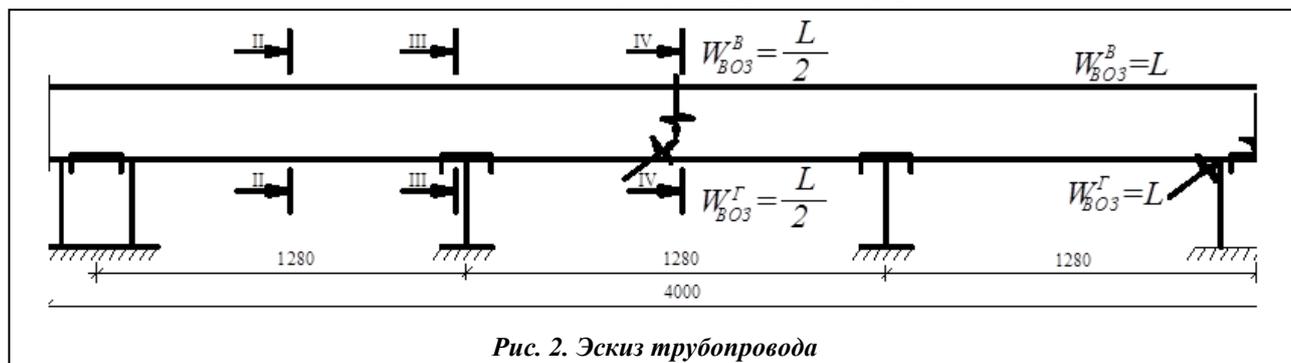


Рис. 2. Эскиз трубопровода

которая создавалась нагнетанием в трубу воздуха компрессором; в) влияние предварительного напряжения, которое имитировалось навиванием высокопрочной проволокой на корпус модели с усилием натяжения $0,75S_{cr}$ и шагом $a = d$ и $a = 3d$, где S_{cr} – критическое усилие потери устойчивости стенки оболочки. Проводились испытания без избыточного давления и с избыточным давлением, равным 1,0 МПа.

Исследовались свободные затухающие колебания конструкции. Из осциллограммы свободных колебаний определялась частота, период колебаний и логарифмический декремент. Для исследования вынужденных колебаний конструкции возмущающая сила прикладывалась в середине пролета, как показано на рис. 2, и с правого конца конструкции. Подчеркнем, что вибратор устанавливался так, чтобы возбуждать как горизонтальные, так и вертикальные колебания конструкции. Для анализа резонансных колебаний исследовалась амплитудно-частотная характеристика, частота возмущающей силы изменялась квазистатически.

2. Результаты экспериментального анализа

2.1. Статический анализ предварительных напряжений

Экспериментально исследовалось напряженно-деформируемое состояние трубопровода под действием статического внутреннего давления. Предварительное напряженное состояние достигалось навивкой высокопрочной проволоки на корпус модели. В результате экспериментального анализа установлено, что вследствие навивки проволоки окружные напряжения уменьшились в 1,2–3,6 раза, а меридиональные – увеличились в 2–2,2 раза. Вместе с тем деформации стенки предварительно напряженного трубопровода за счет стесненности корпуса обмоткой уменьшились в 1,2–4,2 раза в зависимости от условий эксплуатации и параметров предварительного напряжения. Установлено, что наибольший эффект от использования предварительного напряжения достигается при сравнительно высоких уровнях внутреннего избыточного давления, при котором совместность работы стенки трубопровода и напрягаемой обмотки способствует некоторому сглаживанию линии деформации и напряжений стенки трубопровода.

Из приведенных экспериментальных результатов следует, что стеснение корпуса обмоткой существенно снижает уровень эквивалентных напряжений, наблюдающихся в цилиндрической оболочке. Это связано с тем, что вклад окружных напряжений, величина которых значительно уменьшается, в эквивалентные напряжения значительно выше, нежели вклад меридианных напряжений, величина которых при стеснении корпуса увеличивается.

Форма изгиба стенки конструкции в продольном направлении близка к форме изгиба трехпролетной стержневой системы постоянного сечения.

2.2. Анализ свободных колебаний

Экспериментально исследовались параметры свободных колебаний конструкций, к которым относятся собственные частоты и декременты колебаний. Анализировалось влияние на эти параметры предварительного напряжения в трубопроводах и эксплуатационных характеристик конструкции.

Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице. В первом столбце таблицы показан тип рассматриваемой конструкции; в третьем – усилия натяжения, которыми создаются предварительные напряжения в конструкции; в четвертом – уровень заполнения жидкостью внутри трубопровода; в пятом – величина избыточного внутреннего давления в трубопроводе; в шестом – представлены собственные частоты колебаний конструкции. В числителе показаны собственные частоты горизонтальных колебаний, а в знаменателе – собственные частоты вертикальных колебаний. В седьмом столбце представлены декременты колебаний.

При горизонтальных колебаниях движения конструкции происходили параллельно основанию, а при вертикальных – перпендикулярно. Схема возбуждения горизонтальных и вертикальных колебаний представлена на рис. 2. Экспериментально исследовались три варианта заполнения трубопровода жидкостью. Первый случай соответствует трубопроводу без жидкости. Во втором и третьем случае трубопровод заполнен жидкостью наполовину и полностью. Динамика конструкции исследовалась с нулевым внутренним давлением и с внутренним давлением, равным 1 МПа.

Анализ осциллограмм затухающих свободных колебаний модели предварительно напряженного трубопровода свидетельствует о качественном влиянии проволоочной обмотки на механизм по-

глощения энергии колебаний, что подтверждается монотонностью убывания кривой огибающей амплитуд затухающих колебаний. Подчеркнем, что такая огибающая имеет вид экспоненты. Этот вывод можно сделать из величин декрементов затухания, представленных в таблице. В конструкции без обмотки декременты затухания маленькие. Наибольшие декременты затухания в модели Б, где наиболее густая обмотка. Как следует из таблицы, обмотка трубопровода увеличивает логарифмический декремент в 1,2–2,2 раза.

Обмотка трубы играет роль оребрения, то есть нити обмотки работают совместно со стенкой. Поэтому жесткость конструкции повышается и увеличиваются собственные частоты в 1,4–1,6 раза.

Характер изменения частот и декрементов колебаний моделей предварительно напряженного трубопровода в зависимости от силы натяжения нити обмотки показал (см. таблицу), что изменение усилия предварительного натяжения от $0,25S_{cr}$ до $0,75S_{cr}$ приводит к увеличению частоты основного тона колебаний моделей в среднем в 1,5–1,6 раза, а логарифмического декремента колебаний в 1,2–1,25 раза. Это объясняется тем, что с увеличением уровня предварительного напряжения эффект включения нитей обмотки в совместную работу со стенкой увеличивается.

Частоты и декременты свободных колебаний конструкций трубопроводов

Тип модели	Шаг навивки обмотки	Усилие натяжения	Уровень налива	Внутреннее давление, МПа	Частота свободных колебаний, Гц	Декремент колебаний
Модель А	–	–	0	0	12,9/12,8	0,132/0,190
				1,0	12,8/10,2	0,122/0,115
			0,5	0	12,1/9,6	0,117/0,115
				1,0	10,2/8,2	0,108/0,07
			1,0	0	11,0/8,2	0,112/0,102
				1,0	9,2/7,5	0,104/0,062
Модель Б	d	$S = 0,75S_{cr}$	0	0	21,8/23,2	0,196/0,230
				1,0	17,6/12,8	0,186/0,171
			0,5	0	15,2/16,8	0,169/0,171
				1,0	13,4/10,8	0,136/0,115
			1,0	0	13,8/15,2	0,162/0,167
				1,0	12,3/10,4	0,126/0,091
Модель В	$3d$	$S = 0,75S_{cr}$	0	0	18,6/16,8	0,173/0,220
				1,0	15,4/11,6	0,168/0,152
			0,5	0	13,2/14,0	0,158/0,152
				1,0	11,8/10,1	0,122/0,10
			1,0	0	12,4/13,2	0,153/0,148
				1,0	10,8/9,6	0,112/0,102

2.3. Анализ вынужденных колебаний

Исследовались вынужденные горизонтальные и вертикальные периодические установившиеся колебания. Для исследования горизонтальных колебаний к конструкции сбоку крепился рабочий орган вибратора (рис. 2). В результате возбуждались колебания, параллельные основанию конструкции. Для возбуждения вертикальных колебаний вибратор устанавливался под конструкцией (рис. 2). Тогда возбуждались колебания в плоскости опор. При горизонтальных колебаниях конструкции экспериментально определялась амплитудно-частотная характеристика моделей с учетом различных эксплуатационных условий и параметров предварительного напряжения. Подчеркнем, что исследовались свойства установившихся периодических колебаний трубопроводов с обмоткой. Результаты анализа амплитудно-частотной характеристики представлены на рис. 3 в области первых двух резонансов.

Анализ амплитудно-частотных зависимостей показал существенное влияние навитой проволоки на амплитуду и резонансные частоты вынужденных горизонтальных колебаний трубопровода. В присутствии обмотки пики амплитудно-частотных характеристик становятся менее выраженными, что свидетельствует о существенном увеличении демпфирования в системе. По-видимому, при коле-

баниях конструкции наблюдается трение между трубой и проволокой, навитой на трубу. Это трение существенно увеличивает коэффициент линейного демпфирования конструкции. Поэтому амплитуды резонансных колебаний в конструкции с навитой проволокой меньше, чем амплитуды колебаний трубы без проволоки.

Наблюдается увеличение значений частот вынужденных колебаний как по первой, так и по второй формам резонансных колебаний в среднем в 1,2–1,5 раза при горизонтальных колебаниях и в 1,2–1,6 раза при вертикальных в зависимости от эксплуатационных условий и шага навиваемой проволоки. При этом наибольшие значения увеличения частот соответствуют модели предварительно напряженного трубопровода с шагом навивки обмотки, равным d . Частоты вынужденных резонансных колебаний увеличились в 1,2–1,8 раза, а амплитуды колебаний уменьшились в 1,3–2,2 раза в зависимости от уровня налива, наличия или отсутствия внутреннего избыточного давления и параметров предварительного напряжения, по сравнению с данными испытания трубопроводов без обмотки. Как обсуждалось выше, при обматывании проволокой трубы наблюдается повышение жесткости конструкции, что приводит к увеличению резонансных частот колебаний.

Амплитуда колебаний модели предварительно напряженного трубопровода уменьшилась в среднем на 1,2–1,8 раза при горизонтальных колебаниях и в 1,1–1,8 раза при вертикальных колебаниях как по первой, так и по второй формам резонансных колебаний, в зависимости от заполнения трубопровода жидкостью, внутреннего избыточного давления в трубопроводе и шага навивки проволоки. Установлено, что характер колебаний моделей предварительно напряженного трубопровода соответствует форме колебаний балки постоянного сечения, заземленной по концам.

Испытания модели предварительно напряженного трубопровода под внутренним давлением показали, что графики амплитудно-частотных характеристик модели имеют более плавный характер по сравнению с вариантом отсутствия внутреннего давления.

Так как амплитуды резонансных колебаний уменьшаются при наматывании проволоки на конструкцию, то этот способ можно использовать для сейсмической защиты трубопроводов.

3. Обсуждение приложений результатов

Сравнение данных статических испытаний предварительно напряженных трубопроводов с различным шагом навивки проволоки показывает отсутствие качественных отличий в характере распределения деформации стенки и напряжении в кольцевом сечении. Однако в модели предварительно напряженного трубопровода с шагом навивки обмотки, равным $3d$, наблюдается увеличение напряжений и деформации стенки трубопровода по сравнению с данными испытаний трубопровода с шагом навивки, равным d .

Из экспериментального анализа вынужденных колебаний моделей трубопроводов с навитой проволокой следует ряд преимуществ таких конструкций в сравнении с трубопроводами без навивки. Во-первых, наблюдается уменьшение динамической нагруженности трубопровода с навитой проволокой по сравнению с конструкцией без проволоки. Первая собственная частота напряженного трубопровода до 1,8 раза выше этого же параметра обычного трубопровода. Амплитуда резонансных колебаний напряженных трубопроводов уменьшается до 2 раз, а значение логарифмического декремента колебаний повышается в среднем в 2,2 раза. Во-вторых, предварительно напряженные трубопроводы могут эффективно использоваться в сейсмических районах. Известно, что если частота собственных колебаний по своим значениям совпадает с частотами сейсмического воздействия, то конструкция попадает в зону резонансных колебаний с большими амплитудами. Такие колебания часто приводят к разрушениям конструкции и, как следствие, к экологическим катастрофам. С помощью предварительного натяжения проволоки можно отстроить трубопровод от резонансных режимов колебаний. Так, регулируя параметрами навивки проволоки, можно отстроить собственную частоту трубопровода от доминантных частот колебаний грунта. В таком случае навивку проволоки на трубопровод можно рассматривать как сейсмическую защиту конструкции, с одной стороны, и как способ управления динамическими характеристиками – с другой.

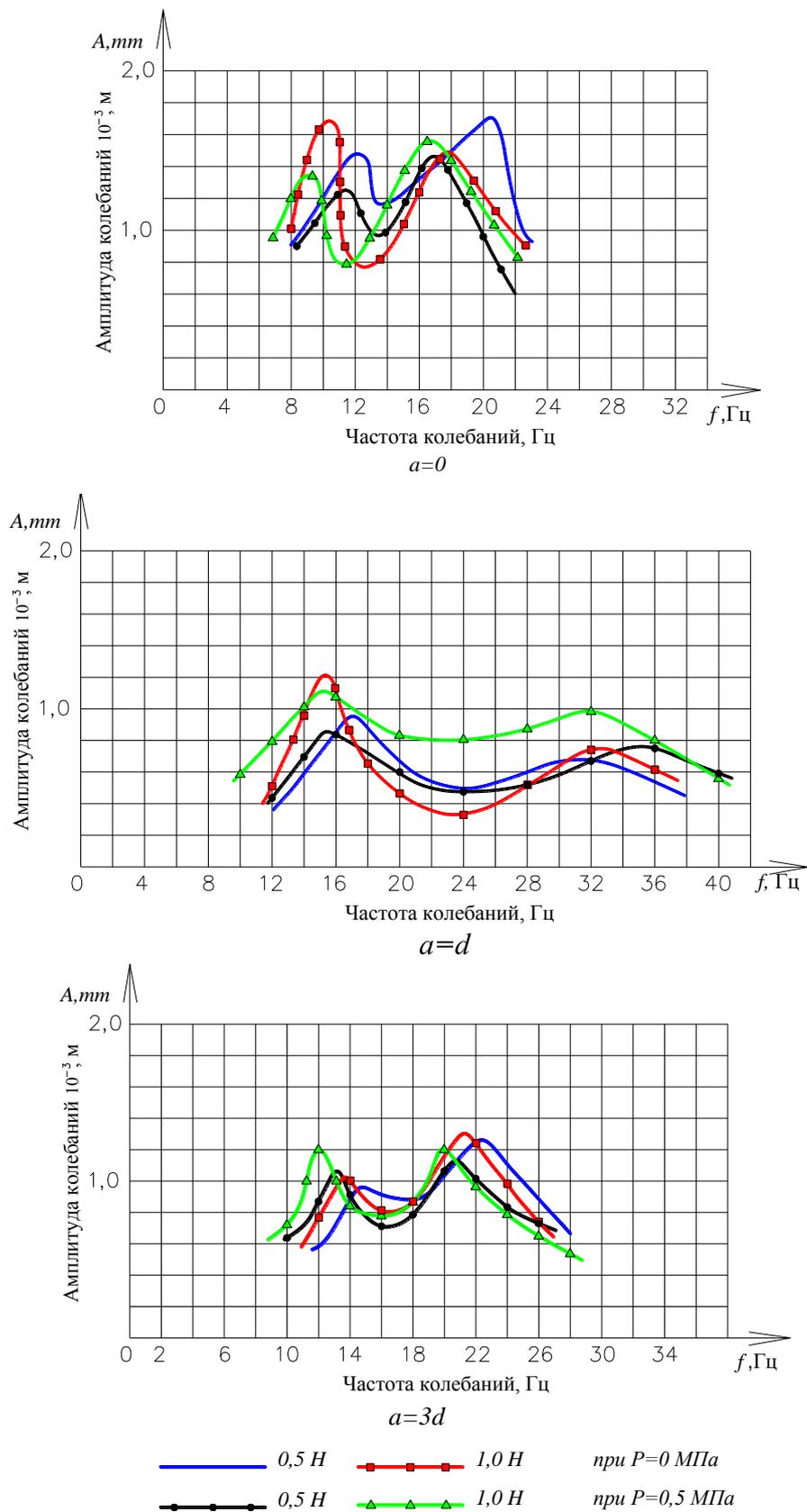


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики колебаний моделей

Заключение

Результаты экспериментальных исследований колебаний моделей трубопроводов показали, что с помощью создания предварительных напряжений высокопрочной обмоткой можно значительно уменьшить динамическую нагруженность. В статье показано, что данный способ может быть использован для сейсмической защиты конструкции, так как можно управлять динамическими характеристиками трубопровода выбором параметров навивки проволоки (шаг навивки и усилие натяжения нити). Перспективным направлением исследований является использование наматывания проволоки для сейсмической защиты листовых конструкций, таких, как резервуары, газгольдеры и т.д.

Исследования выполнены по договору на научно-исследовательские работы в рамках государственного заказа Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан.

Литература

1. *Беленя, Е. И.* Предварительно-напряженные несущие металлические конструкции / Е. И. Беленя. – М.: Стройиздат, 1975. – 416 с.
2. *Беленя, Е. И.* Предварительно-напряженные металлические листовые конструкции / Е. И. Беленя, С. М. Астряб, Э. Б. Рамазанов. – М.: Стройиздат, 1979. – 192 с.
3. *Сулейменов, У. С.* Перспективы применения предварительного напряжения в металлических конструкциях нефтеперерабатывающей промышленности / У. С. Сулейменов, А. Б. Молдагалиев, Н. Ж. Жанабай, М. К. Укибаев // Наука и образование Южного Казахстана. – 2005. – № 3. – С. 51–53.
4. *Айнабеков, А. И.* Работа надземных предварительного напряженных трубопроводов при эксплуатационных нагрузках / А. И. Айнабеков, Б. Р. Арапов, У. С. Сулейменов // Наука и образование Южного Казахстана. – 2003. – № 35. – С. 12–14.
5. *Воеводин, А. А.* Предварительно напряженные системы элементов конструкций / А. А. Воеводин. – М.: Стройиздат, 1989. – 298 с.
6. *Остсемин, А. А.* Прочность бандажированного нефтепровода при наклонной обмотке / А. А. Остсемин, В. Ю. Заварухин // Пробл. прочности. – 1990. – № 11. – С. 100–105.
7. *Пуховский, А. Б.* К вопросу повышения сейсмостойкости металлических конструкций предварительным напряжением / А. Б. Пуховский // Стр-во и архитектура. – 1984. – № 4. – С. 10–13.
8. *Андреев, Л. В.* Влияние предварительного напряжения на величину предельного давления цилиндрической оболочки / Л. В. Андреев, А. П. Решетилова, В. И. Рузин // Пробл. прочности. – 1986. – № 1. – С. 86–91.
9. *Заварухин, В. Ю.* К расчету предельного состояния бандажированных труб / В. Ю. Заварухин, А. А. Остсемин // Пробл. прочности. – 1990. – № 1. – С. 76–81.
10. *Смирнов, А. И.* Об эффективности бандажирования труб и цилиндрических сосудов / А. И. Смирнов // Пробл. прочности. – 1983. – № 12. – С. 77–79.
11. СНиП 2.05.06-85. Магистральные трубопроводы. Нормы проектирования. – М., 1985. – 52 с.
12. СНиП 2.04.12-86. Расчет на прочность стальных трубопроводов. – М., ГУП ЦПП, 2001. – 12 с.

Поступила в редакцию 21.12.15