

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ МЕМБРАННЫХ ПОКРЫТИЙ

**Ц**ели, задачи, методы и средства проведения экспериментальных исследований. Расчет мембранных конструкций на динамические воздействия является сложной инженерной задачей. Известные аналитические методы определения динамических характеристик мембранных покрытий не носят универсальный характер и не могут быть использованы для расчетов большинства реальных конструктивных решений мембранных систем. Численные методы, имеющиеся стандартные расчетные программы нуждаются в тщательной апробации с точки зрения достоверности получаемых результатов и возможности применения в практике проектирования.

Такое положение дел в области расчетов мембранных покрытий и актуальность задачи создания достоверной методики определения их собственных динамических характеристик, основанной и апробированной данными действительной работы этих сооружений, определяют необходимость проведения экспериментальных исследований динамических характеристик. К таким характеристикам, в первую очередь, относятся параметры собственных колебаний мембранного полотна.

Настоящая статья посвящена описанию разработанных авторами методики, способов и средств проведения и результатов комплексных экспериментальных исследований динамических характеристик мембранных покрытий производственных зданий на примере исследований динамической работы покрытия ангарного корпуса для аэропорта в г. Риге, имеющего в плане прямоугольное очертание размером 108×60 м [1]. Исследования выполнены на базе динамических испытаний крупномасштабной модели (масштаб 1:25) реального объекта. Общий вид и конструкция ангара приведены на рис. 1 и 2.

Новизна и уникальность конструкции, особенности монтажа мембранного покрытия, при котором предусматривается наличие отдельных свободно провисающих полотен мембраны, а также неапробированность расчетных методик определения собственных динамических характеристик, учитывающих в полной мере особенности конструкций ангара с самого начала про-



**И.Л. Ружанский**  
лауреат Госпремии СССР,  
почетный строитель РФ, к.т.н.



**И.З. Шульман**  
директор Днепропетровского  
комплексного отделения  
ООО «Укринсталькон  
им. В.Н. Шимановского», к.т.н.

ектирования, предопределяли необходимость проведения комплекса экспериментальных исследований на моделях и натурной конструкции.

Цель проведения этих исследований, проводимых на различных стадиях проектирования и строительства ангара, формулировалась следующим образом:

- уточнение расчетных значений собственных динамических характеристик мембранной системы и ее элементов;
- получение на базе экспериментальных исследований достоверных данных о параметрах динамической работы мембранного покрытия, необходимых для проверки эффективности принятых при проектировании конструктивных решений по обеспечению эксплуатационной надежности металлоконструкций в условиях монтажа, реального ветрового воздействия и технологических нагрузок, имеющих динамический характер;
- изучение динамической работы системы с целью совершенствования методов динамического расчета мембранных покрытий и возможности использования разработанной конструкции для сооружения аналогичных зданий, в т.ч. расположенных в зонах повышенной сейсмичности.

В процессе проведения динамических испытаний и экспериментальных исследований определялись параметры собственных колебаний



Рис. 1. Ангарный корпус в г. Риге, монтаж мембранного покрытия

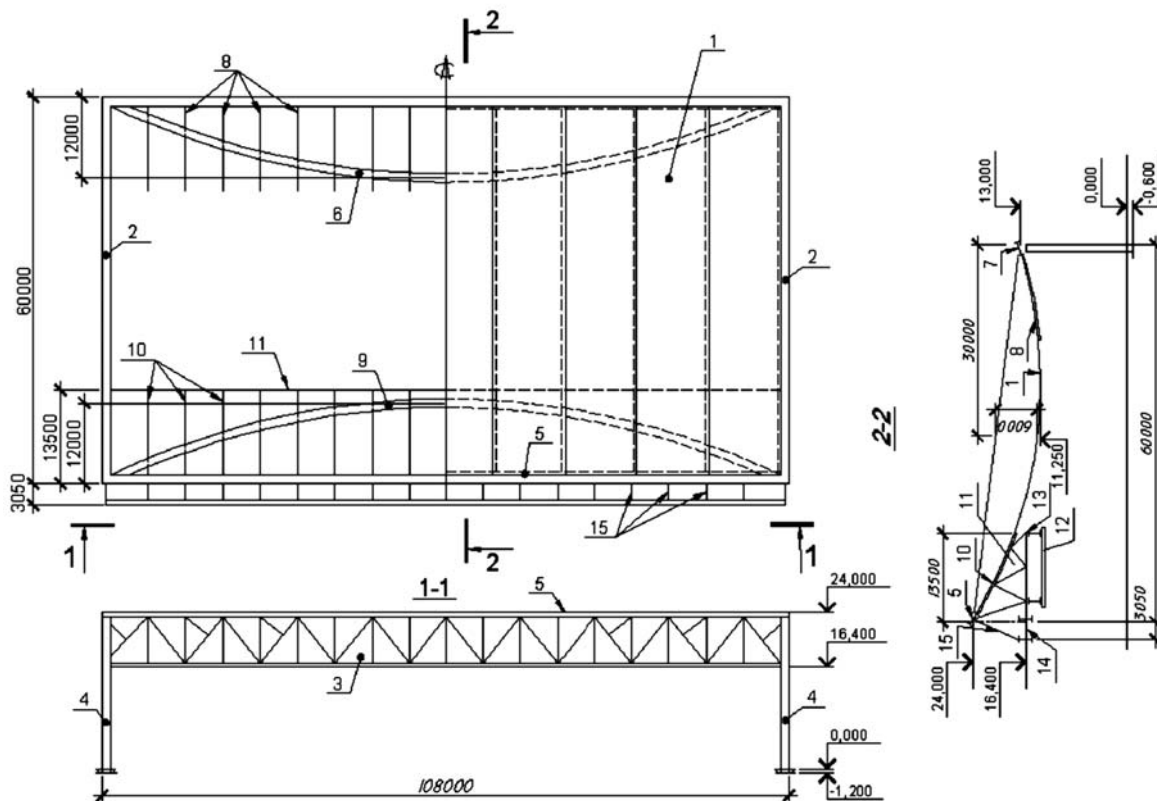


Рис. 2. Конструктивная схема ангара:

1 – мембранное покрытие; 2 – криволинейные продольные балки; 3 – надворотная ферма; 4 – колонны; 5 – верхний пояс надворотной фермы; 6 – криволинейный подбор из полосы; 7 – торцевая балка; 8 – распорки; 9 – подбор; 10 – верхние пояса консольных ферм; 11 – консольные фермы; 12 – подвесные краны; 13 – связевая ферма; 14 – горизонтальная ферма; 15 – наклонные жесткие подвески

модели мембранного покрытия и его фрагмента (монтажной полосы) при различных видах загрузки постоянной и сосредоточенной нагрузкой и жесткости опорного контура, а также характер колебаний модели при воздействии горизонтальной нагрузки, подобной сейсмической.

По результатам проделанной работы выполняется:

- сопоставление данных аналитического и экспериментального определения динамических характеристик модели;
- оценка влияния способов возбуждения колебаний на результаты определения собственных динамических характеристик модели и способов реализации статической нагрузки на получаемые экспериментальные динамические характеристики модели;
- оценка пригодности разработанных методов и средств возбуждения и регистрация колебаний, обработка результатов испытаний для экспериментальных исследований модели мембранного покрытия в целом.

**Методика и средства динамических испытаний модели.** Модель, жесткостные характеристики опорного контура покрытия которой с учетом масштабного коэффициента соответствуют принятым в проекте реальной конструкции ангара, принималась как базовая. Для оценки зависимости собственных частот вертикальных колебаний мембранного покрытия от изменения жесткости опорного контура в конструкции модели, кроме базовой (вариант № 1), создаются варианты. По одному из вариантов (вариант № 2) продольные жесткости элементов опорного контура уменьшаются в два раза по сравнению с базовой, по другому – в три раза (вариант № 3).

Для базовой модели при масштабных коэффициентах, приведенных в [1], критерий подобию, т.е. соотношение между частотами колебаний модели  $f_m$  и натурной конструкции  $f_n$ , составляет:

$$f_n = 0,2 f_m.$$

В процессе испытаний модель загружалась равномерно распределенной нагрузкой, моделирующей собственный вес конструкций покрытия, пригруз, временную длительную нагрузку. Для оценки зависимости низшей собственной формы колебаний мембранного покрытия от изменения статической нагрузки модель дополнительно поэтапно загружалась нагрузкой, моделирующей расчетную снеговую нагрузку на покрытие.

Динамические испытания мембранного покрытия состояли в идентификации собственных форм колебаний на основе экспериментального определения резонансных частот и соответствующих им виброперемещений, зарегистрированных в некоторых точках модели. По результатам измерений определяются также декременты колебаний модели.

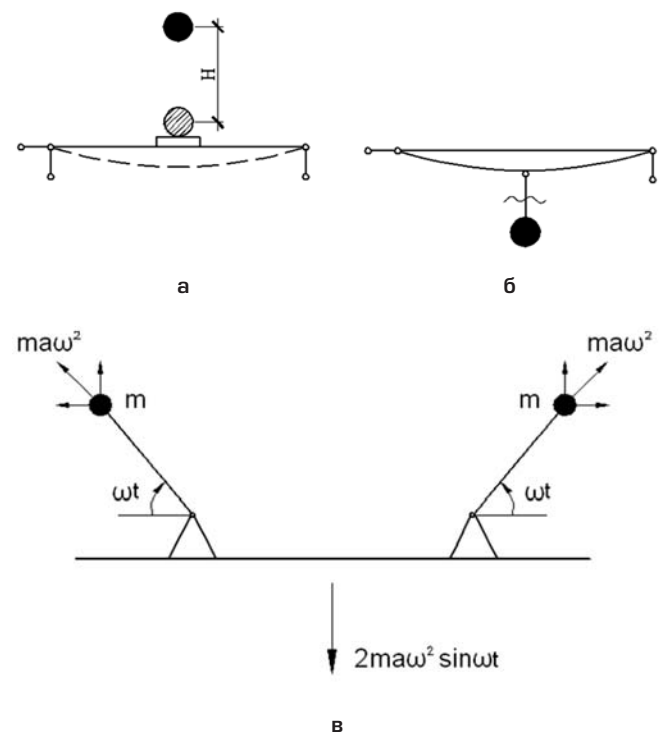
Динамические испытания модели ангара предполагают создание динамических нагрузок, вызывающих колебания мембранного покрытия с собственными частотами, соответствующими различным формам колебаний, регистрацию этих колебаний и обработку полученной информации с целью определения действительных частот колебаний.

Из существующих методов приложения динамических нагрузок к испытываемым моделям строительных конструкций (механические, гидравлические, пневматические и электрические)

для создания динамических нагрузок на модель мембранного покрытия предпочтительно использование механических способов создания циклических нагрузок.

Схемы вариантов возбуждения динамических нагрузок для создания колебаний модели, которые рассматривались при разработке методики испытаний, приведены на рис. 3. Наиболее предпочтительными для возбуждения колебаний в вертикальной плоскости оказались последние два варианта.

Принцип реализованного метода (рис. 3, б), заключался в том, что над необходимой точкой мембраны на определенной высоте  $H$  закрепляется груз заданной массы. Затем в момент запуска регистрирующей аппаратуры освобождаются связи, удерживающие груз, что и вызывает приложение возмущающей силы в заданной точке. Величина возмущающей силы зависит от массы груза и высоты закрепления его над мембраной. Скорость груза в момент соприкосновения с поверхностью покрытия модели ангара  $V = \sqrt{2gH}$ . При этом масса груза должна быть существенно меньше массы конструкции. В ином случае присоединение массы груза к конструкции исказит ее динамические характеристики.



**Рис. 3. Варианты схем возбуждения динамических нагрузок покрытия модели ангара:**

**а, б, в** – возбуждение колебаний сбрасыванием груза; обрывом нити, предварительно натянутой грузом; механическим вибратором направленного действия соответственно

В экспериментах масса груза составляла 3 кг, что не превышало 0,7 % от массы мешков, уложенных на покрытие модели (постоянная нагрузка).

Способ возбуждения колебаний с помощью вибратора (рис. 3, в) заключается в том, что источник гармонических синусоидальных колебаний устанавливается в необходимых точках. Изменяя частоту вращения ротора вибратора, добиваются резонансного режима колебаний модели.

В качестве источника гармонических колебаний в эксперименте использовалось специально разработанное и изготовленное устройство – вибровозбудитель, основным элементом которого является укрепленная на оси вращения дебалансная масса. Величину дебалансной массы можно было менять в широком диапазоне путем изменения расстояния центра массы от оси вращения. Ось приводится во вращение специальным тиристорным электродвигателем, соединенным с ней при помощи гибкой тяги. Скорость вращения двигателя изменяется с помощью регулируемого источника напряжения. Основное требование к конструкции вибратора – минимальный вес. Суммарная масса описываемого вибратора не превышала 1 % массы модели и таким образом не оказывала влияние на собственные формы колебаний.

**Измерение параметров вертикальных колебаний модели.** Схема расположения точек возбуждения и регистрации колебаний модели приведена на рис. 4.

Поиск резонансных частот, соответствующих собственным частотам модели, при возбуждении колебаний вибрационным способом осуществлялся следующим образом. На вибровозбудитель, установленный в одной из точек модели, подавалось напряжение  $U$ , изменяемое ступенями. При этом, естественно, изменялась частота вращения двигателя и, соответственно, частота генерируемых механических колебаний. Для каждого значения  $U$  выполнялась запись колебаний по всем каналам измерительной системы. Это позволяло визуально фиксировать участки значительного нарастания амплитуд колебаний точек модели, соответствующие резонансным режимам. Таким образом, определяются значения  $U$ , при которых частота генерируемых вибратором колебаний совпадает с одной из собственных частот модели.

В описываемом эксперименте регистрация параметров вертикальных колебаний мембраны осуществлялась с помощью многоканальной измерительной системы на основе специально разработанных индукционных датчиков (измеряемый параметр – виброскорость, градуировочная характеристика – линейная). Аналоговый сигнал всех датчиков регистрировался многоканальным быстродействующим самописцем и магнитоэлектрическим осциллографом. Кроме того, предусматривалась регистрация выходных сигналов датчиков с помощью 14-канального магнитографа, а также путем ввода в компьютер через аналого-цифровой преобразователь.

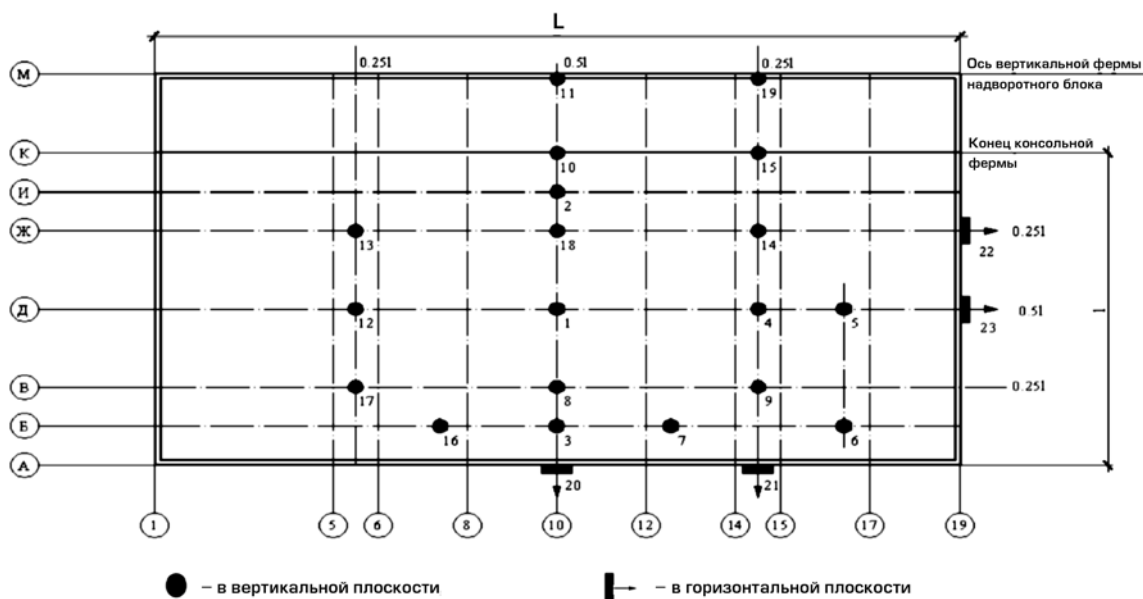


Рис. 4. Схема расположения точек возбуждения и регистрации колебаний

Параметры колебаний для стационарных процессов определялись известными методами непосредственно по осциллографическим записям колебательного процесса путем вычисления частоты, фазы и коэффициентов для графического построения собственных форм колебаний. Для полигармонических процессов динамические характеристики мембранного покрытия модели определялись методами спектрального анализа.

При возбуждении колебаний сбрасыванием груза собственные частоты и амплитуды определялись либо путем непосредственной обработки записей колебаний (при моногармоническом процессе), либо, при достаточной длине реализации полигармонического затухающего колебательного процесса методом спектрального анализа. В последнем случае статистический анализ колебаний выполнялся с привлечением программных средств, например, по программе СРЕКТР1. Структура программного комплекса для сбора и обработки экспериментальных данных приведена на рис. 5.

Параметры горизонтальных колебаний изучались путем вибровозбуждений колебаний модели с помощью вибратора, закрепляемого гибкими связями (тросами) к опорному контуру. Импульсная горизонтальная нагрузка создавалась путем приложения к опорному контуру модели усилия в горизонтальном направлении с последующим мгновенным снятием наложенной связи в точках 7, 8, 11, 12 (рис. 6). Величина усилия в эксперименте составляла 320 Н.

Для регистрации колебаний мембраны в вертикальном направлении, вызванных горизонтальными силами, использовались индукционные датчики перемещений. Регистрация колебаний опорного контура в горизонтальном направлении осуществлялась вибродатчиками.

Расположение первичных преобразователей (датчиков) на модели мембранного покрытия в процессе динамических испытаний показано на рис. 6.

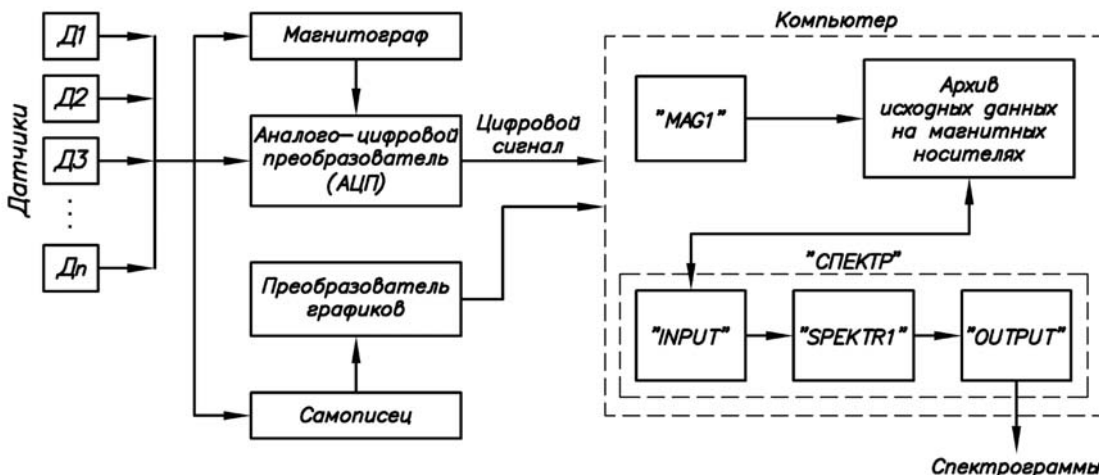


Рис. 5. Структура программного комплекса для сбора и обработки экспериментальных данных

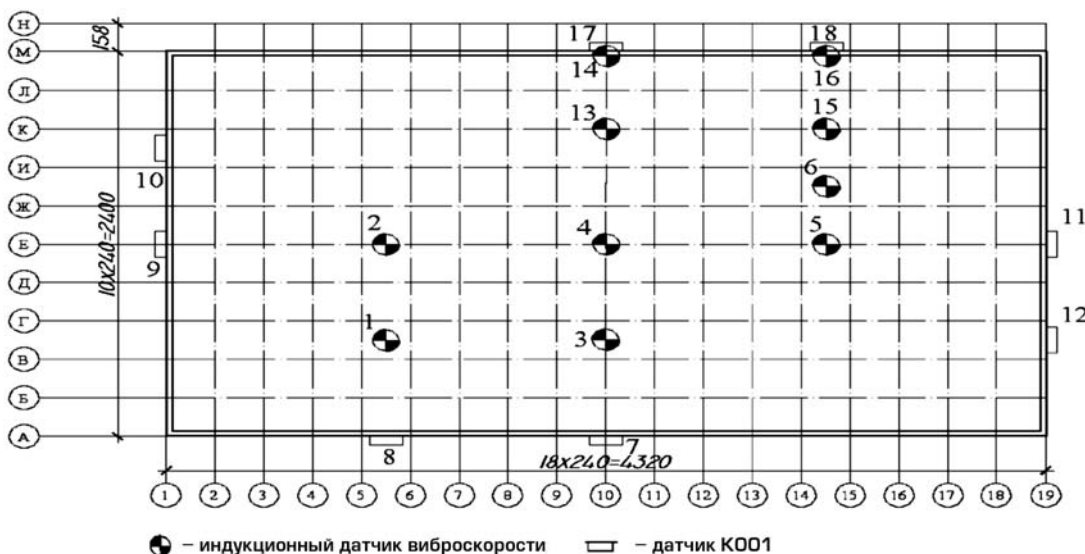


Рис. 6. Расположение датчиков при определении параметров горизонтальных колебаний модели мембранного покрытия

**Результаты испытаний.** Динамические характеристики мембранного покрытия модели ангара. В соответствии с программой работ испытательная вертикальная динамическая нагрузка реализовывалась двумя способами: импульсным воздействием на мембрану в местах предполагаемых пучностей каждой из 5–6 ожидаемых низших собственных форм колебаний и возбуждением путем установки вибратора в одной из точек пучности по каждой из предполагаемых форм колебаний (рис. 7).

Для оценки зависимости низшей собственной частоты вертикальных колебаний мембранного покрытия от изменения жесткости опорного контура в конструкцию модели вносились изменения: по одному из вариантов продольная жесткость опорного контура уменьшалась в два раза по сравнению с базовой, по другому – в три раза.

Для оценки зависимости низшей собственной частоты вертикальных колебаний мембранного покрытия от изменения статической нагрузки модель дополнительно поэтапно загружалась нагрузкой, моделирующей расчетную снеговую нагрузку на покрытие. Величины нагрузок приведены в работе [1].

Импульсная горизонтальная нагрузка создавалась путем приложения к опорному контуру модели усилия в горизонтальном направлении в точках 20...23 (см. рис. 4) с последующим мгновенным снятием наложенной связи. Фрагмент характерной записи колебаний мембранного

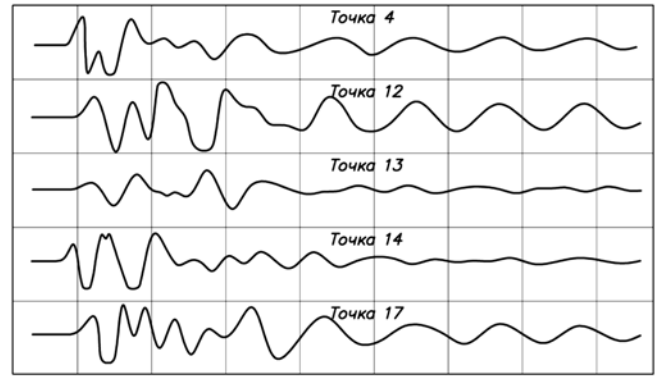


Рис. 8. Фрагмент записи колебаний модели мембранного покрытия. Импульсное возбуждение в т. 1

ного покрытия при импульсном возбуждении представлен на рис. 8.

Динамические характеристики мембраны были получены путем обработки осциллограмм, на которых осуществлена одновременная запись колебаний в 6–8 точках покрытия модели. Для этого в каждой записи фиксируется размах колебаний в определенный момент времени и определяется фаза колебаний. Затем определяется среднее значение частоты за десять периодов колебаний и вычисляется логарифмический декремент колебаний в характерных точках покрытия. По полученным данным определяются относительные значения амплитуд колебаний и с учетом фазы колебаний строятся формы колебаний покрытия в двух направлениях.

Результаты, полученные при динамических испытаниях базового варианта модели, приведены в таблице.

Для двух вариантов статической нагрузки на покрытие (первый вариант:  $q_1 + q_2$  – собственный вес + пригруз + технологические нагрузки, второй –  $q_1... q_4$  – то же, + временная длительная нагрузка) по результатам эксперимента идентифицировано шесть низших форм колебаний и соответствующие им частоты. Формы, изображенные на рис. 9, были получены при возбуждении колебаний как методом сбрасывания груза, так и вибратором направленного действия.

Эти же формы идентифицированы на основе возбуждения колебаний как в точке 1, так и в точках 4 или 17 (см. рис. 4).

Сводные данные по результатам испытаний с индексированными формами колебаний и соответствующими частотами приведены в таблице. Индексация форм соответствует приведенной на рис. 7.

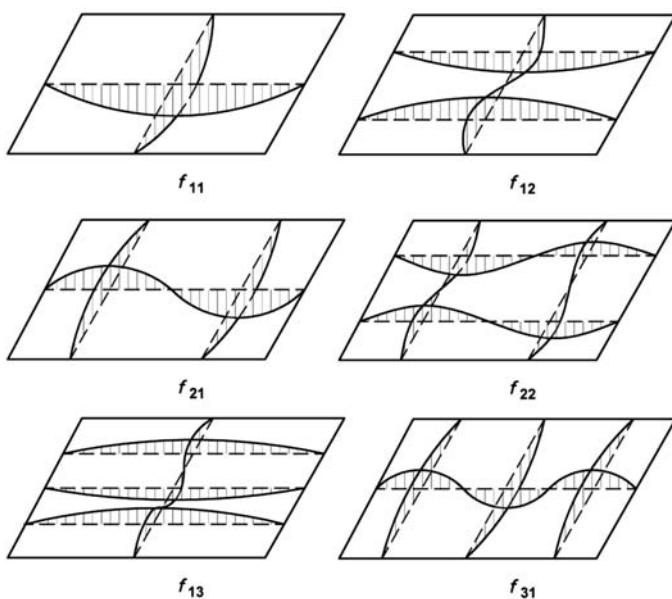


Рис. 7. Предварительная оценка шести низших собственных форм колебаний модели мембранного покрытия

**Результаты динамических испытаний  
базового варианта модели**

Формы колебаний	Частоты колебаний, Гц	
	нагрузка $q_1, q_2$	нагрузка $q_1... q_4$
$f_{11}$	4,90	4,55
$f_{12}$	–	5,75
$f_{22}$	6,50	7,05
$f_{13}$	7,35	9,05
$f_{21}$	9,35	9,15
$f_{31}$	12,35	–

Чередование форм в таблице дано в порядке возрастания частот собственных колебаний. Ограничение количества полученных форм колебаний обусловлено техническими возможностями и реальной практической ценностью получаемых результатов. Низшей, по результатам экспериментов, оказалась форма, имеющая по одной полуволне в каждом направлении, или согласно рис. 9 – форма  $f_{11}$ . Формы  $f_{12}$  при статической нагрузке  $q_1, q_2$  и  $f_{31}$  при нагрузке  $q_1... q_4$  в процессе испытаний не наблюдались.

В связи с возбуждением собственных колебаний покрытия разными способами и в нескольких точках, полученные в эксперименте

величины частот колебаний имеют некоторый разброс. В частности, при нагрузке  $q_1... q_4$  для формы  $f_{11}$  значение частоты колебаний составило 4,55. В таблице приведены усредненные значения частот колебаний, а для формы  $f_{11}$  предпочтение отдано значениям, полученным методом сбрасывания груза. Первые шесть значений частот собственных колебаний покрытия находятся в диапазоне от 4,5 до 12,5 Гц.

Обращает на себя внимание минимальное различие в величинах частот колебаний, соответствующих формам  $f_{13}$  и  $f_{21}$  при статической нагрузке  $q_1... q_4$ . С целью уточнения значений частот в этом диапазоне проводились повторные измерения. По результатам этих измерений были подтверждены значения частот, приведенные в таблице.

Анализ полученных данных позволил изучить влияние величины нагрузки на покрытие и жесткость опорного контура модели на частоты низших форм колебаний мембраны. Графические зависимости этих параметров отображены на рис. 10 и 11 соответственно.

По результатам измерений получены спектрограммы колебаний модели в различных режимах (стационарных, вынужденных, переходных) (рис. 12 и 13).

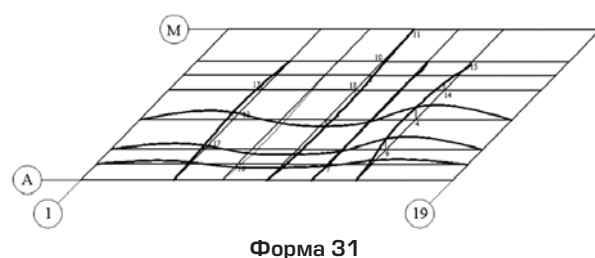
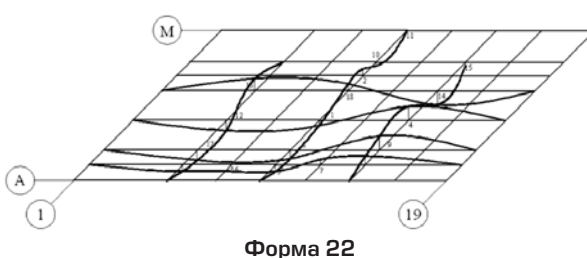
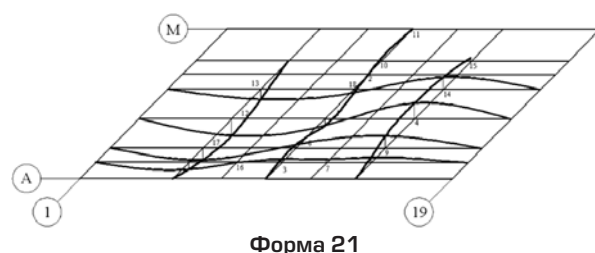
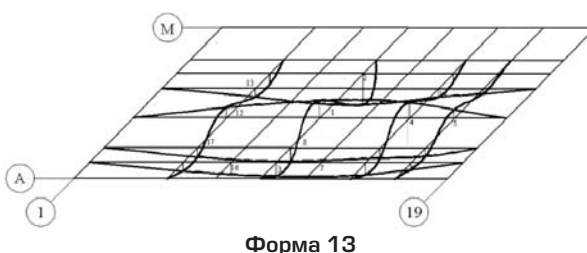
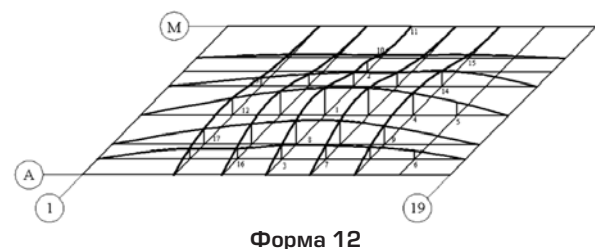
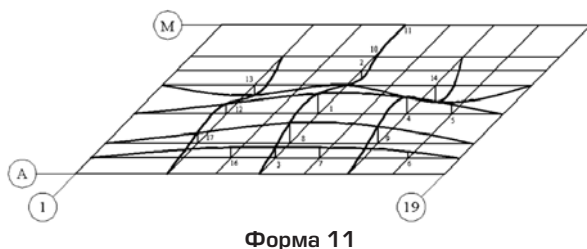


Рис. 9. Формы собственных колебаний мембранного покрытия базового варианта модели

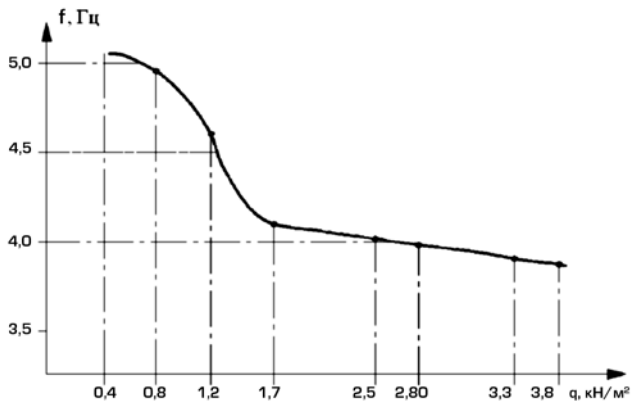


Рис. 10. Зависимость частоты низшей формы колебаний мембраны от величины нагрузки на покрытие модели

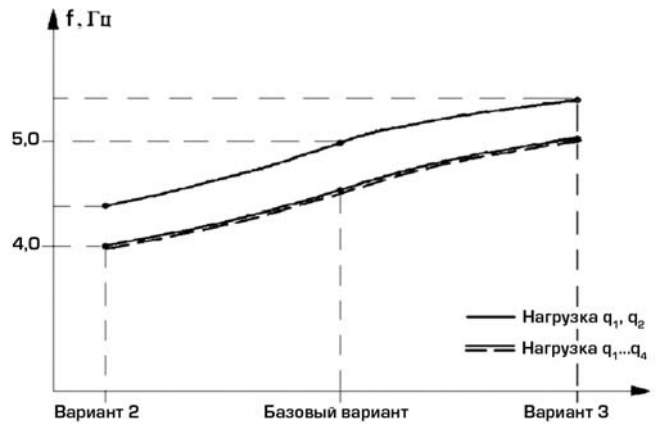


Рис. 11. Зависимость частоты низшей формы колебаний покрытия от жесткостей опорного контура моделей

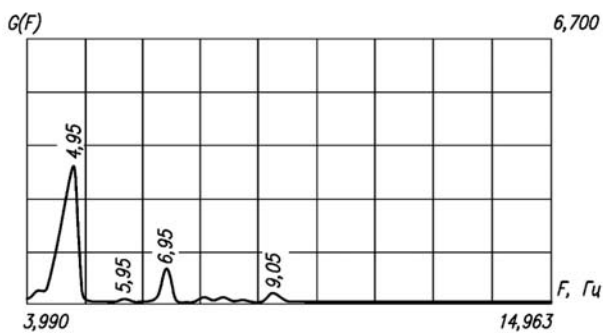


Рис. 12. Спектрограмма колебаний модели мембранного покрытия.  
Возбуждение импульсное в т. 21.  
Регистрация колебаний в т. 20

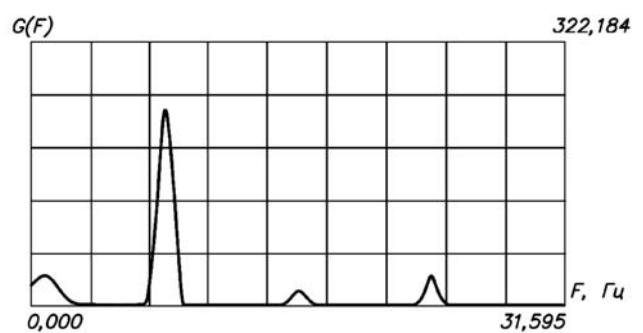


Рис. 13. Спектрограмма колебаний модели мембранного покрытия.  
Возбуждение импульсное в т. 5.  
Регистрация колебаний в т. 8

Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы:

- Низшие собственные частоты колебаний мембраны лежат в частотном диапазоне 4,8...17,3 Гц. Спектры собственных частот хорошо видны, например, на рис. 12 и 13, где максимумы автоспектра виброскорости колебаний соответствуют частотам 4,8 Гц; 6,9 Гц; 9,2 Гц; 12,6 Гц.
- Низшей собственной формой является форма с одной полуволной вдоль каждой из сторон мембраны (при этом колебания всех точек мембраны происходят в одной фазе). Максимум формы находится в окрестности точки 4.
- Форма с одной полуволной вдоль длинной стороны и двумя полуволнами вдоль короткой стороны мембраны имеет частоту  $f_{21} = 7,9$  Гц.
- При вибрационном и импульсном способах возбуждения колебаний опорный контур колеблется с частотой мембраны. При час-

тотах до 11 Гц точки опорного контура, расположенные вдоль одной стороны, движутся в одной фазе. При более высоких частотах обнаружено их движение в противофазе.

- При импульсном возбуждении устойчивые колебания мембраны в горизонтальной плоскости не обнаружены. После приложения нагрузки возникают только ее колебания в вертикальном направлении.
- Декремент колебаний мембраны составляет  $\delta = 0,036...0,08$  (среднее значение по различным экспериментам –  $\delta = 0,05$ ).

[1] Шульман И.З. Экспериментальные динамические исследования мембранного покрытия на прямоугольном плане: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.01 / Игорь Зиновьевич Шульман. – Москва, 1992. – 248 с.

Надійшла 11.11.2015 р.