ЗАСНОВНИКИ

ДЕРЖАВНА КОРПОРАЦІЯ «УКРМОНТАЖСПЕЦБУД»

ТОВ «УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ім. В.М. ШИМАНОВСЬКОГО»

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 17750-6600 ПР від 07.04.2011 р.

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР
Адріанов В.П.

ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР
Лукашевич Т.І.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Абрашкевич Ю.Д., д.т.н., проф.
Беркута А.В., к.е.н.
Голоднов О.І., д.т.н., проф.
Гончаренко Д.Ф., д.т.н., проф.
Гордеєв В.М., д.т.н., проф.
Гуляєв В.І., д.т.н., проф.
Єгоров Є.А., д.т.н., проф.
Кваша В.Г., д.т.н., проф.
Корольов В.П., д.т.н., проф.
Лантух-Лященко А.І., д.т.н., проф.
Лобанов Л.М., академік НАНУ, д.т.н., проф.
Мущанов В.П., д.т.н., проф.
Оглобля О.І., д.т.н., проф.
Пасечнюк В.Л.
Пічугін С.Ф., д.т.н., проф.
Стоянов В.В., д.т.н., проф.
Шимановський О.В., член-кор. НАНУ, д.т.н., проф.

МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА РАДА
на 2015 — 2016 роки

Абель Д., д.т.н., проф. (США)
Агощ З., д.т.н., проф. (Словаччина)
Бєлоєв М., к.т.н. (Болгарія)
Вєдяков І.І., д.т.н., проф. (Росія)
Грінченко В.Т., академік НАНУ, д.т.н., проф. (Україна)
Зюлко Є., д.т.н., проф. (Польща)
Кавагучі М., д.т.н., проф. (Японія)
Каравайченко М.Г., д.т.н., проф. (Росія)
Като Ш., д.т.н., проф. (Японія)
Кульбах В., академік НАНЕ, д.т.н., проф. (Естонія)
Лан Т., д.т.н., проф. (Китай)
Назаров Ю.П., д.т.н., проф. (Росія)
Новак А., д.т.н., проф. (США)
Розерт Х., д.т.н., проф. (Німеччина)
Сидорович Є.М., д.т.н., проф. (Білорусь)
Спарлінг Б., д.т.н., проф. (Канада)
Трощенко В.Т., академік НАНУ, д.т.н., проф. (Україна)
Тулєбаєв К.Р., д.т.н. (Казахстан)
Янковяк Р., д.т.н., проф. (Польща)

НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ ЖУРНАЛ

ПРОМИСЛОВЕ БУДІВНИЦТВО ТА ІНЖЕНЕРНІ СПОРУДИ

1'2016

Виходить 4 рази на рік

Заснований у листопаді 2007 року

ЗМІСТ

НАУКА – ВИРОБНИЦТВУ

А.В. Шимановский, З.А. Шульман, И.З. Шульман

ИСПЫТАНИЯ И МОНИТОРИНГ СТРОИТЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ, ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ 2

З.А. Шульман

ДЕЙСТВИТЕЛЬНАЯ РАБОТА ВАНТОВОГО АВТОДОРОЖНОГО МОСТА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РЕАЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК 15

И.З. Шульман

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АНТЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ БАШЕННОГО ТИПА 21

И.Л. Ружанский, И.З. Шульман

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ МЕМБРАННЫХ ПОКРЫТИЙ 28

З.А. Шульман

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА БОЛЬШЕПРОЛЕТНОГО ВИСЯЧЕГО МОСТА 36

Е.С. Иосилевич

К ПОСТРОЕНИЮ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОЖУХОВ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ И ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ 43

ЮВІЛЕЙНІ ДАТИ

СИТНИК МИКОЛА ПЕТРОВИЧ (до 80-річчя від дня народження)

Постановою президії ВАК України від 18.11.2009 р. № 1-05/5 журнал внесено до переліку наукових фахових видань із технічних наук

Київ • 2016

© Промислове будівництво та інженерні споруди, 2016

ИСПЫТАНИЯ И МОНИТОРИНГ СТРОИТЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ, ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

А.В. Шимановский
генеральный директор
ООО «Укринсталькон
им. В.Н. Шимановского»,
член-корреспондент НАН Украины,
заслуженный деятель науки и техники
Украины, д.т.н., профессор

З.А. Шульман
технический директор
корпорации «Промстальконструкция»,
к.т.н., г. Днепропетровск

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

Имеющие комплексный характер задачи создания и внедрения новых высокоэффективных конструктивных форм, прогрессивных технологий изготовления и способов монтажа, выявления резервов снижения материалоемкости при обеспечении эксплуатационной надежности строительных конструкций решаются не только на стадиях расчетно-теоретических исследований и проектирования, но и на базе экспериментальных исследований и испытаний конструкций и сооружений.

Необходимость проведения этих работ на разных стадиях создания и функционирования строительных объектов определяется исходя из степени новизны и сложности конструктивных решений, достоверности исходных данных для проектирования, а также с целью выявления фактических резервов несущей способности и получения достоверных данных о параметрах действительной работы конструкций, характеризующих эксплуатационную надежность зданий и сооружений.

Экспериментальные работы, закладываемые в процессе проектирования и реализуемые на этапах изготовления, монтажа и эксплуатации уникальных и ответственных зданий и сооружений, работающих в сложных климатических условиях, а также при воздействиях малоизученных технологических нагрузок, являются основным, а в ряде случаев единственным критерием оценки эффективности проектных решений и надежности работы сооружений в период эксплуатации.

Несмотря на возможности современных методов отработки конструктивных форм в лабораторных условиях, роль натурных испытаний – неоспорима. Именно при их проведении полностью выявляются особенности взаимодействия сооружения с технологическим оборудованием и окружающей средой, определяются эксплуатационные характеристики, а в отдельных случаях устанавливаются новые, характерные для данной конструкции, параметры работы, приводящие при проектировании конструкций-аналогов к их существенным доработкам. Кроме того, по результатам натурных испытаний дается интегральная оценка соответствия действительного напряженно-деформированного состояния, динамических характеристик и других параметров работы конструкций расчетным моделям, создаются предпосылки для оценки и прогнозирования эксплуатационной надежности сооружений.

Проведение испытаний рекомендуется также в тех случаях, когда существующие методы оценки технического состояния конструкций не позволяют сделать достоверный вывод об их пригодности к безопасному восприятию эксплуатационных нагрузок и воздействий как после возведения, так и после истечения определенного срока службы.

В соответствии с действующими нормативными документами обязательным испытаниям подлежат головные образцы серийных конструкций, уникальные сооружения, не апробированные практикой проектирования, возведения и эксплуатации, а также особо ответственные конструкции.

Особое значение имеют исследовательские испытания, в т.ч. конструкций-прототипов, выполняемые с целью подтверждения экспериментальным (опытным) путем расчетной несущей способности конструкции или установления действительной несущей способности не прибегая

к расчетам. Несущая способность при этом может рассматриваться как совокупность условий, относящихся к нагрузкам и деформированию, при которых в конструкции или конструктивном элементе могут возникнуть предельные состояния, приводящие к ограничению несущей способности или непригодности к эксплуатации.

Поведение конструкций, подверженных действию статических и динамических нагрузок, зависит от ряда факторов случайной природы, которые могут быть разбиты на две группы. К одной группе относятся геометрические и физические параметры самой конструкции: случайные отклонения от идеальной геометрической формы, разброс способов осуществления граничных условий, упругих и прочностных характеристик материала и др., ко второй – случайные параметры, характеризующие нагрузки и другие «внешние» условия эксплуатации конструкций.

Параметры действительной работы зданий и сооружений в этих условиях изучаются и контролируются путем мониторинга или долговременных натурных инструментальных наблюдений, что является одной из разновидностей испытаний, представляющих собой комплекс экспериментальных работ (контрольные измерения, осмотры, обработка и анализ результатов и пр.) по определению текущих значений параметров фактических нагрузок и воздействий на собственно сооружение, его работу и состояние.

Обоснованием необходимости или целесообразности проведения испытаний и мониторинга в процессе эксплуатации могут служить следующие основные факторы.

Первый фактор. При проектировании рассматриваются идеализированные системы, и в качестве исходных данных используются вероятностные характеристики факторов случайной природы, полученные на основании статистических данных. Реальная система всегда в той или иной мере отличается от идеализированной, составляющей содержание проекта. Условия эксплуатации реальной системы также могут существенно отличаться от рассматриваемых на стадии проектирования. Кроме того, методика расчета по предельным состояниям строительных конструкций мало учитывает изменчивость расчетных факторов (снеговая, ветровая и волновая нагрузки). Достаточно сложны и закономерности изменения во времени нагрузок от мостовых кранов, полезных нагрузок на перекрытия, сейсмических и температурных воздействий.

Таким образом, резервы снижения материалоемкости и повышения надежности строительных конструкций в значительной степени зависят от того, насколько точно определены величины нагрузок, воздействующих на сооружения, и их реальные сочетания, а также статистическая оценка взаимодействия конструкций зданий и сооружений с этой нагрузкой и окружающей средой.

Для решения этой задачи целесообразно применение системы инструментального мониторинга за работой конструкций зданий и сооружений, в первую очередь высокоответственных и уникальных, проектирование и возведение которых не опробировано опытом строительства.

Второй фактор. Расчетная схема любого сооружения должна соответствовать реальным условиям работы сооружения и наиболее полно учитывать все действующие факторы и быть по возможности упрощенной. Первое усложняет расчетную схему, увеличивает объемы расчетных работ, второе ведет к замене действительных условий работы сооружения некоторой упрощенной расчетной схемой.

Наличие сложных компьютерных программ дает возможность более точно выбирать расчетные схемы, однако их усложнение не всегда приводит к учету всех факторов, определяющих действительную работу сооружения. В связи с этим, усложнение расчетной схемы, которое может привести к ожидаемому уточнению расчета, должно быть оправдано экспериментальными данными.

Третий фактор. При установлении расчетных усилий и напряжений исходят из нормативных характеристик нагрузок и материалов, учитывая соответствующие поправки на возможные их отклонения. Между тем, при оценке технического состояния, несущей способности конструкций, а также при определении параметров действительной работы сооружений необходима точная характеристика материала, фактических величин нагрузок, которые могут иногда существенно отклоняться от нормативных.

Четвертый фактор. В расчетах на прочность, как правило, не учитывают того, что применяемый в строительстве материал не является сплошным, однородным и изотропным. При оценке действительных условий работы конструкций приходится учитывать отклонения от принятых в рачетах гипотез в отношении свойств материала конструкций, основные из

которых следующие: нарушения сплошности, неоднородность, анизотропность материала, переменность его физико-механических свойств по различным направлениям в одной и той же точке.

Пятый фактор. При расчете сечений из совместно работающих элементов и сечений, составленных из пакета стали, исходят из предположения их совместной работы. Между тем, несовершенства соединений нередко обуславливают появление сдвигов внутри пакета, искажающих расположение усилий и напряжений по сравнению с расчетным. Поэтому действительные условия работы составных сечений требуют уточнений путем соответствующих испытаний.

Шестой фактор. Экспериментального подтверждения требуют изменения во времени параметров работы сооружения в процессе эксплуатации металлоконструкций, обусловленные непостоянством внешних воздействий, изменчивостью свойств материала и грунтового основания, расстройством стыков и соединений элементов, появлением дефектов в материале, связанных с перегрузкой несущих конструкций и динамическим характером работы сооружения.

Переменность силовых воздействий, например, от крановой нагрузки, от усилий, возникающих при работе машин и динамически действующего оборудования и т.п., как правило, учитывается в расчетах весьма приближенно. Однако, переменные воздействия оказывают на сооружения и иные факторы, которые не могут быть отражены в расчетах.

Седьмой фактор. Известно, что неравномерное распределение и изменение температуры по поверхности конструкций создает в материале неравномерное поле напряжений, что в ряде случаев вызывает циклические деформации. Подобные деформации и перемещения, нередко довольно значительные, проявляются, например, в результате неравномерного нагрева лучами солнца металлических резервуаров и газгольдеров, конструкций металлических мостов и антенно-мачтовых сооружений.

Учет этих факторов, необходимых для уточнения параметров работы конструкций на малоцикловую усталость, возможен, в основном, проведением долговременных инструментальных наблюдений за внешними условиями и реакцией на эти изменения сооружений.

Восьмой фактор. Исследования в области металловедения показывают, что материал конструкций изменяет свои свойства в зависимости от его характеристик, климатических условий эксплуатации и типа нагрузок. Характеристики металла в элементах конструкций, работающих в упругой стадии, остаются практически стабильными. Пластические же деформации вызывают явление наклепа, влияющего на физико-механические свойства металла (снижение пластичности, увеличение хрупкости и т.д.).

При оценке реальной несущей способности конструкций выявление и учет возможных изменений характеристик материалов является задачей первостепенной важности и решается на основе инструментальных методов.

Девятый фактор. Известно, что расстройство стыков и соединений элементов явление в строительной практике достаточно частое. При вводе сооружений в эксплуатацию при первых же загружениях возникают сдвиги и пластические деформации в соединениях и связях, сопровождающиеся появлением характерных для начальной работы конструкций остаточных прогибов и перемещений. Постепенно элементы как бы взаимно «притираются» и приспосабливаются к условиям эксплуатации, и остаточные сдвиги и прогибы снижаются. Недопустимость остаточных деформаций ставит задачи экспериментального контроля этих параметров при вводе сооружения в эксплуатацию в первый период работы. Особенно это важно для многоэлементных стержневых конструкций с соединениями на болтах, вантовых сооружений и др.

Таким образом, при оценке технического состояния и параметров действительной работы вновь возводимых и эксплуатируемых сооружений необходимо учитывать следующее:

- условность расчетных схем, их идеализацию и возможность отклонения;
- условность ряда расчетных характеристик материалов;
- возможность отклонений от расчетных значений нагрузок и их сочетаний;
- влияние внешней среды, не учитываемое в обычных расчетах.

Очевидно, что существует разрыв между динамической работой, в частности высотных зданий и сооружений, предполагаемой исходя из теоретических моделей, и их действительной работой.

По данным отечественных и зарубежных исследований, при воздействии ветра доверительный интервал значений реакции конструкций составляет ±300 %, т.е. действительные максимальные перемещения (деформации) могут отличаться от расчетных в три раза. После

введения в расчет экспериментальных данных этих величин, полученных для конструкций-аналогов, доверительный интервал падает до 50 %. Хотя этот способ корректировки расчетной модели не является совершенным, однако он дает удовлетворительные результаты.

С другой стороны, на стадии проектирования исходная информация, выдаваемая в виде задания, часто недостаточно достоверна, а принятые расчетные схемы идеализированы. У проектировщика возникает иллюзия «точного расчета», за счет которого хотят максимально приблизить расчетную реакцию к действительной.

Сказанное не означает, что теоретические методы не дают объективную оценку динамической реакции сооружений. Просто расчетные данные необходимо использовать с известной осторожностью. Объективная информация о параметрах действительной динамической работы уникальных сооружений при воздействии естественных природных факторов (ветер, волны, землетрясения) может быть получена исключительно путем проведения натурных экспериментальных исследований, испытаний и долговременных наблюдений как на вновь возводимых, так и уже построенных зданиях и сооружениях. Сопоставляя данные о собственных динамических параметрах конструкций и реакции сооружения на силы естественного происхождения, имеющие случайный характер, с полученными в результате исследований на расчетных моделях, можно добиться высокой достоверности теоретических методов оценки и прогнозирования динамической работы сооружений.

Основанием для включения натурных испытаний в разработки новых высокоэффективных технических решений и инструментальных наблюдений (мониторинга) в составе организационно-технических мероприятий по оценке технического состояния эксплуатируемых уникальных и ответственных зданий и сооружений являются соответствующие нормативные документы.

В зависимости от целей и задач проведения различают следующие виды испытаний:

- установление предельной прочности или функциональности конструктивных элементов;
- получение специфических особенностей новых материалов, примененных при проектировании;
- уточнение параметров моделей нагрузки или воспринимающих их конструкций, например, испытания в аэродинамической трубе, испытания прототипов натурных размеров или масштабных моделей;
- определение качества изделий или постоянства их характеристик;
- определение действительных условий строительства, например, после нагружения конструкций;
- проверка поведения сооружения или его конструктивных элементов после окончания строительства, например, испытания для проверки предельных состояний прочности или функциональности;
- использование результатов испытаний для проектирования различных сооружений-аналогов, включая применение при разработке норм проектирования.

В соответствии с ГОСТ 16504-81 «Испытания и контроль качества продукции» испытания в строительной отрасли классифицируются в зависимости от назначения, места и условий проведения, методов проведения, а также вида испытательных нагрузок и воздействий.

По своему назначению испытания подразделяются на следующие.

Исследовательские испытания элементов конструкций или специально изготовленных образцов проводятся в порядке научно-исследовательских и проектно-конструкторских разработок. Как правило, они являются составной частью экспериментально-теоретических исследований и обычно связаны с созданием или совершенствованием теории и методов расчета конструкций и сооружений, отработки новых конструктивных форм.

В процессе экспериментальных работ проверяется влияние свойств материалов, геометрических параметров и условий работы конструкций на прочность и надежность сооружения в процессе эксплуатации.

Испытания опытных конструкций, проводимые перед внедрением их в массовое производство, являются одновременно заключительным этапом научно-исследовательских или опытно-конструкторских работ и испытанием вновь изготовленных конструкций. Необходимость их проведения возникает в случае применения новых конструктивных решений, более совершенных методов расчета, новых материалов, технологии изготовления и др. Опытные конструкции испытываются, как правило, до разрушения, что позволяет выявить наиболее слабые места и внести в проект коррективы, устраняющие выявленные недостатки. При этом доста-

точно оценить общие деформации (прогибы) и сопоставить их с расчетными. Цель этих испытаний – установление качества образцов серийно изготавливаемых конструкций или их элементов. Кроме того, они могут служить проверкой качества конструкций после их модификации, ремонта и т.п.

Опытные образцы новых конструкций, изготовленные предприятием-изготовителем при авторском надзоре организации-разработчика, подвергают предварительным, приемочным испытаниям и испытаниям (наблюдениям) в процессе опытной эксплуатации.

Приемочные испытания являются неразрушающими и не приводят конструкцию к предельному состоянию по потере несущей способности. Цель таких испытаний – установление действительных характеристик (параметров работы) конструкций сооружения или его элементов. Они проводятся в основном при приемке строительно-монтажных работ, для которых такие испытания предусмотрены нормативными актами или проектом.

Приемочные испытания могут проводиться на сооружениях, построенных как по типовым, так и индивидуальным проектам и выполняются на полностью законченных и сданных в эксплуатацию сооружениях.

Методика и программа проведения испытаний указываются в проекте, а порядок проведения – в специальном проекте производства работ или разделе проекта.

Величина испытательной нагрузки должна учитывать постоянную и временную эксплуатационные нагрузки с соответствующими коэффициентами надежности по нагрузке и их сочетания, а также возможные неблагоприятные характеристики материалов и грунтов, отклонения от проекта геометрических параметров и дефектов, имеющих место при изготовлении и монтаже конструкций. Испытательная нагрузка прикладывается ступенями с равным шагом, число ступеней должно быть не менее пяти. Интервалы между ступенями должны быть такой продолжительности, чтобы обеспечить адаптацию соединений к нагрузке и стабилизировать возникшие деформации. Очень важно в процессе испытаний обеспечить разгружение конструкции при 0,5 и 0,75 максимальной нагрузки. Максимальная испытательная нагрузка должна поддерживаться на протяжении времени, необходимого для обеспечения стабильности деформаций, но в любом случае не менее 1 часа.

Испытания конструкций сооружений при сдаче их в эксплуатацию совмещают с контрольными измерениями напряженно-деформированного состояния и динамических характеристик. Такие измерения необходимы, если возникли сомнения в прочности и надежности конструкций, что связанно с наличием дефектов, неустраненных в процессе их монтажа, а также для контроля прочности конструкций в процессе их нагружения испытательной нагрузкой с тем, чтобы предупреждать о достижении ими недопустимого уровня напряжений или деформаций.

Испытания эксплуатируемых зданий и сооружений проводятся, если необходимо увеличить нагрузку, действующую на несущие конструкции этих сооружений, выявить фактические запасы прочности или если надежность несущих конструкций вызывает сомнение вследствие износа или повреждений, при решении вопроса о реконструкции или пригодности к дальнейшей эксплуатации зданий и сооружений.

Одним из способов получения объективной оценки технического состояния конструкций, подлежащих реконструкции зданий и сооружений является проведение натурных испытаний и долговременных инструментальных наблюдений за их работой. Во время натурных испытаний выявляются особенности взаимодействия сооружений с гидрометеорологическими и технологическими нагрузками, определяются эксплуатационные характеристики, а в некоторых случаях устанавливаются новые, не учтенные расчетом, характерные для данной конструкции параметры работы. Долговременные инструментальные наблюдения за работой конструкций в реальных эксплуатационных условиях дополняют, уточняют и повышают достоверность данных, полученных при натурных, как правило разовых, испытаниях.

Испытания контроля качества – это предварительные испытания, которым подвергают опытные конструкции. При этом достаточно оценить общие деформации (прогибы) и сопоставить их с расчетными. Этот вид испытаний проводится с целью установления качества образцов серийно изготавливаемых конструкций или их элементов. Кроме того, они могут служить проверкой качества конструкций после их модификации, ремонта и т.п.

Для вновь осваиваемых конструкций испытания и контроль качества их опытных образцов – неотъемлемая часть постановки на производст-

во. Опытные образцы новых конструкций, изготовленные предприятием-изготовителем при авторском надзоре организации-разработчика, подвергают предварительным, приемочным испытаниям и испытаниям (наблюдениям) в процессе опытной эксплуатации.

Испытания контроля качества являются неразрушающими, при их проведении ни конструкция, ни ее элементы не доводятся до предельного состояния по потере несущей способности. Из каждой промышленной серии конструкций или конструктивных элементов выбирается случайным образом соответствующее число опытных образцов, имеющих полную аналогию в технологии изготовления и соблюдения стандартов, определяющих их качество. Физико-химические характеристики материала опытных образцов должны также соответствовать прототипу конструкции. Максимальная величина измеренных деформаций, как правило, составляет 0,8–0,9 расчетных. Приемочные испытания должны обязательно включать измерения напряженно-деформированного состояния. Особое внимание обращают на очевидные остаточные деформации. Если после разгрузки конструкции будут зарегистрированы остаточные деформации, превышающие 10 % деформаций, соответствующих максимальной нагрузке, проводят повторные испытания. Процедура нагружения и разгрузки та же, что и при проведении приемочных испытаний.

Испытания контроля качества отличаются от приемочных испытаний конструкций тем, что величина испытательной нагрузки задается таким образом, чтобы убрать факторы, которые могли бы привести к возникновению предельных напряжений.

Испытания конструкции-прототипа выполняются с целью экспериментальным (опытным) путем подтвердить расчетную несущую способность конструкции или установить действительную, не прибегая к расчетам. Несущая способность при этом может рассматриваться как совокупность условий, относящихся к нагрузкам и деформированию, при которых в конструкции или конструктивном элементе могут возникнуть предельные состояния.

Испытаниям подвергается головной образец конструкции-прототипа. При этом особое внимание уделяется определению фактических прочностных свойств стали, учитывается разность между действительным пределом текучести по данным лабораторных измерений и расчетным значением. Величина испытательной нагрузки, прикладываемой равными ступенями с определенной выдержкой на каждой ступени, рассчитывается таким образом, чтобы не довести конструкцию или ее несущие элементы до полного разрушения.

По результатам испытаний для каждого предельного состояния определяются:

- расчетное значение несущей способности испытываемой конструкции или конструктивного элемента с учетом действительного отклонения характеристик материала и действительной работы конструкций;
- критерии предельного состояния конструкций по пределу текучести материала и непригодности к эксплуатации.

В любом случае должна быть определена максимально допустимая деформация конструкции при ее эксплуатации и установлен факт маловероятности появления этой деформации при эксплуатационных величинах, нагрузках и их сочетаниях.

По характеру испытываемых конструкций, месту и условиям проведения испытания делятся на *лабораторные*, *стендовые* и *натурные*, проводимые в условиях, соответствующих эксплуатации испытываемого объекта с непосредственным оцениванием или контролем определенных характеристик нагрузок и реакции на них сооружения, а также испытания конструкций проектных геометрических размеров и испытания с использованием моделей. При этом различают испытания специальных образцов, натурных конструкций или сооружений, а также их моделей.

Специальные образцы применяются обычно при испытаниях, проводимых с научно-исследовательскими целями. Натурные конструкции и сооружения испытываются проверкой их работы в условиях эксплуатации. Если в силу разных причин испытания натурных конструкций или сооружений трудно реализовать, испытаниям подвергаются их модели.

Разновидностью натурных испытаний являются натурные инструментальные наблюдения за поведением сооружений в естественных климатических и эксплуатационных условиях, которые выполняются, как правило, на уникальных сооружениях, работающих на сложные технологические нагрузки, в условиях гидрометеорологических воздействий и других природных факторов. Кроме того, наблюдениям подвергают конструкции и сооружения, если стоит за-

дача статистической оценки внешних нагрузок и реакции сооружения на эти нагрузки, необходимой для уточнения исходных данных для проектирования конструкций-аналогов.

Испытываемые конструкции по параметрам работы могут быть линейными и нелинейными, работающими в упругой стадии характеристики материала и за ее пределами. По геометрическим параметрам различают линейные плоские и пространственные конструкции. По конструктивным решениям – стержневые, листовые, комбинированные.

Модели конструкций могут быть крупномасштабные (от 1:2 до 1:10) и маломасштабные, выполненные из стали, алюминия или другого материала.

По месту проведения различают лабораторные, заводские стендовые и полевые (натурные) испытания.

По методам проведения различают разрушающие испытания, выполняемые до разрушения объекта испытаний, и неразрушающие, проводимые с применением неразрушающих методов.

Испытания конструкций до разрушения выполняются с целью исследования параметров их действительной работы. Они являются единственным средством определения предельной несущей способности и реальной формы разрушения конструкции.

Разрушающим испытаниям подвергают крупномасштабные модели зданий и сооружений, натурные конструкции, их элементы и узлы. Эти испытания выполняются в лабораторных условиях на стендах или на специальных площадках. Программой испытаний должно быть предусмотрено, что анализ полученных результатов позволит установить момент наступления предельного состояния по потере несущей способности и по непригодности к эксплуатации; а также расчетное сопротивление материала конструкции с точки зрения гарантированного предела текучести конструкционной стали.

Количество испытаний устанавливают в зависимости от наблюдаемой дисперсии их результатов.

По характеру внешних воздействий и типу испытательных нагрузок различают испытания статической и динамической нагрузками, которые отличаются как по методике проведения, так и по применяемым средствам измерений.

При проведении натурных испытаний и наблюдений эксплуатируемых зданий и сооружениям решаются такие задачи:

- определение вероятных характеристик, эксплуатационных нагрузок, их интенсивность и сочетания;
- метеорологическое микрорайонирование с целью уточнения ветровых, температурных, снеговых и ледовых нагрузок и их воздействий;
- определение действительных значений общих деформаций и местных напряжений в элементах конструкций от временных статических и динамических нагрузок;
- измерение фактических параметров колебаний сооружения для оценки динамических характеристик и коэффициентов динамичности;
- инструментальный контроль за изменением во времени наиболее ответственных, с точки зрения эксплуатационной надежности, параметров работы конструкций.

По результатам сопоставления экспериментальных данных с расчетными устанавливается расчетная модель конструкции и действительная работа сооружения, оценивается влияние дефектов и повреждений на работу эксплуатируемых конструкций, дается оценка запасов прочности, прогнозируется эксплуатационная надежность сооружений.

В целом натурные испытания и наблюдения в сочетании с другими экспериментальными работами и обследованием обеспечивают достаточно высокую степень достоверности результатов оценки технического состояния конструкций, способствуют принятию более объективного решения о возможности сохранения и использования существующих конструкций зданий и сооружений.

Испытательные и эксплуатационные нагрузки. Важной особенностью натурных испытаний является то, что постоянная эксплуатационная нагрузка может быть дополнена частью испытательной нагрузки, оказывающей то же влияние и действующей в том же направлении, что и постоянная в смонтированной конструкции. Величину испытательной нагрузки рекомендуется определять в долях расчетной нагрузки, определенной по предельному состоянию потери ее несущей способности. Расчеты на испытательные нагрузки для эксплуатируемых сооружений должны быть выполнены с учетом данных оценки технического состояния конструкций, включая механические свойства стали, наличие дефектов и повреждений, отступление от проекта геометрических схем, а так-

же возможности появления в процессе испытания природных воздействий, увеличивающих или уменьшающих испытательную нагрузку.

Суммарный уровень дополнительных и эксплуатационных нагрузок при испытаниях должен, как правило, соответствовать полным нормативным или эквивалентным им значениям. При наличии надежных расчетно-теоретических методов допускается снижать суммарный уровень нагрузок до 0,85 полного нормативного значения. В отдельных случаях, с целью более широкого распространения результатов испытаний отдельных конструкций на конструкции-аналоги, а также для оценки перегрузочной способности конструкции (определения запасов несущей способности) допускается повышение испытательных нагрузок до 1,15–1,20 полных нормативных значений или 0,9 расчетных значений.

Уровень дополнительных нагрузок должен обосновываться с учетом максимального использования эксплуатационных нагрузок и воздействий, а также точного значения ранее достигнутого уровня при эксплуатации.

В любом случае при натурных испытаниях, проводимых с помощью искусственно создаваемых полных или дополнительных нагрузок, нужна защита испытываемой конструкции от недопустимых перемещений и обрушений.

Испытания конструкций, выполняемые при действующих эксплуатационных нагрузках и воздействиях без создания дополнительных искусственных загружений, проводятся в случаях необходимости оценки резерва несущей способности при реконструкции, если в здание или сооружение вводятся нагрузки, превышающие уровень предыдущего периода эксплуатации, а также если такие испытания являются обязательными, проводятся периодически и составляют неотъемлемую часть технологических проверок прочности (краны, газгольдеры, резервуары и др.).

В качестве эксплуатационных нагрузок и воздействий используются гидрометеорологические, технологические, подъемно-транспортные, собственный вес и др. При этом необходимо стремиться загружать конструкции расчетными по схеме приложения нагрузками величиной, составляющей не менее 0,8–0,9 нормативной.

При наблюдениях следует использовать многократно повторяющиеся нагрузки и воздействия, в т.ч. случайные по величине и сочетанию, с целью получения более достоверных результатов параметров действительной работы конструкций. На практике прибегают к комбинированным способам нагружения эксплуатационными нагрузками: по определенной схеме и случайными нагрузками. Измерения параметров работы конструкций по обоим способам выполняются раздельно.

Основные критерии оценки несущей способности конструкций по результатам испытаний.

Статические испытания. Необходимо разработать теоретический прогноз ожидаемых результатов таких испытаний. Сумма этих предположений создает критерии оценки несущей способности испытываемого объекта, получаемые по результатам статических испытаний.

Первый критерий состоит из сравнительных оценок действительных параметров работы конструкций и их расчетно-теоретических моделей. По результатам испытаний можно определить соответствие расчетной схемы действительной работе сооружения в условиях эксплуатации. Если имеются расхождения, результаты испытаний можно использовать для установления оптимальной схемы, которая с наибольшей степенью приближения характеризует действительную работу конструкции.

Величину расхождения экспериментальных данных с расчетными представляют в виде конструктивной поправки (конструктивный коэффициент), представляющей собой отношение величин измеренных характеристик (прогибов, деформаций, напряжений) к величинам одноименных теоретических характеристик. При точном совпадении обеих характеристик конструктивная поправка равна единице. Величина этого отношения является мерой расхождения действительной работы сооружения с его расчетно-теоретической моделью. В связи с идеализацией расчетной схемы и неучета ряда конструктивных особенностей и параметров работы, идущих, как правило, в запас прочности, конструктивная поправка составляет обычно 0,8–0,9.

Второй критерий имеет целью установить степень соответствия рабочей нагрузки предельной, которая может привести к исчерпанию несущей способности конструкции. Этот критерий в наибольшей степени характеризует эксплуатационную надежность сооружения, ибо во всех случаях при оценке несущей способности имеется в виду оценка фактических запасов прочности, которыми обладает запроектированное сооружение.

Несмотря на то, что исчерпывающую информацию о коэффициентах запаса можно получить в результате разрушающих испытаний,

современные методы и средства экспериментального определения напряженно-деформированного состояния конструкций, способы оценки полученных результатов, поверочные расчеты, выполняемые с использованием результатов измерений при неразрушающих натурных испытаниях, обеспечивают вполне достоверные данные, по которым можно судить о запасах несущей способности и эксплуатационной надежности сооружений.

Третий критерий основан на инженерном опыте испытаний сооружений и заключается в следующем: если многократный опыт показывает, что конструкция (сооружение) данного типа выдерживает заданную нагрузку, то конструкция-аналог при тех же условиях достаточно надежна в эксплуатации.

Условие подобия заключается в том, чтобы испытываемая конструкция при загружении имела те же параметры работы, что и расчетные характеристики конструкции-аналога. К таким параметрам в первую очередь можно отнести предельные величины прогибов и деформаций, допускаемые для конструкций, нагружаемых собственным весом и полезной нагрузкой.

Четвертый критерий основывается на оценках работы конструкции, полученных на основании измерений деформаций сооружения по величине и динамике их изменения при росте нагрузки и во времени в тех отдельных точках, которые характеризуют надежность сооружения в целом. Этот критерий может служить надежной основой прогнозирования опасных для сооружения предельных нагрузок, которые могут привести к потере несущей способности.

Динамические испытания зданий и сооружений обычно сопровождаются увеличением деформаций, которые должны возникать при статическом действии нагрузки. В расчетной практике динамическое воздействие учитывается путем введения соответствующих коэффициентов к статической нагрузке. Такой прием при назначении испытательной нагрузки неверен. Конструкции, работающие на динамическое воздействие, необходимо испытывать динамическими нагрузками.

Основной способ оценки величины динамического воздействия и реакции на него конструкции эксплуатируемых сооружений состоит в выявлении отношения полного динамического и статического прогиба (напряжения) к статистическому – коэффициента динамичности. Его величина, зависящая от типа конструкции и характера динамического воздействия, обычно лежит в пределах 1,05–1,4.

Другим критерием оценки динамической прочности является суждение, основанное на том, что если обеспечена прочность «эталонной», уже эксплуатируемой конструкции, то для тех же силовых динамических воздействий обеспечена прочность конструкций-аналогов, если при одинаковом нагружении они имеют одинаковые динамические характеристики: частоты собственных и вынужденных колебаний, декременты затуханий, величина ускорений колебательного процесса и резонансные кривые по амплитуде и затрате энергии.

Этот критерий может широко использоваться для однотипных по конструктивной форме и другим параметрам, определяющим динамические характеристики, сооружений. Однако для уникальных сооружений, не имеющих аналогов по техническому решению, они, как правило, не приемлемы, т.к. на практике невозможно подобрать им эталонные конструкции.

Более сложным приемом оценки динамической прочности являются вибродинамические испытания, имеющие целью создать во время испытаний динамические силы, которые будут иметь место при эксплуатации сооружения. Если это невозможно, применяют уменьшенные силовые воздействия до величин, обеспечивающих получение достоверной информации о характере динамической работы конструкций.

Еще одной задачей динамических испытаний является получение экспериментальным путем коэффициента затухания колебательных процессов конструкции сооружения (декремента затухания). Изменение во времени декремента колебаний может свидетельствовать о нарушении целостности отдельных элементов конструкции и прочности соединений в узлах.

Инструментальные наблюдения (мониторинг), контроль и диагностика строящихся и эксплуатируемых металлоконструкций выполняются с целью прогнозирования надежной и долговременной работы зданий и сооружений. Контроль и наблюдения, в первую очередь, должны проводиться на особо ответственных и уникальных сооружениях, условия эксплуатации которых могут отличаться от расчетных, а нагрузки и воздействия проявляться в экстремальных значениях. В отдельных случаях контроль параметров работы конструкций предусматривается расчетными предпосылками и конструктивными особенностями сооружения, тех-

нологией монтажа, а также в случае ужесточения условий эксплуатации. Применение в строительстве опытной партии (образцов) новых конструкций предусматривает наблюдение за их поведением в условиях монтажа и эксплуатации, результаты которых являются одним из условий для постановки их в серийное производство.

Инструментальные наблюдения, проводимые на отдельных сооружениях, позволяют накапливать ценный экспериментальный материал о фактических нагрузках и реакции сооружения и экстраполировать его на конструкции-аналоги. Кроме того, большой объем информации дает основание для возможных корректировок расчетных схем и методов расчета.

В общем случае задачами инструментальных наблюдений являются:

- сбор данных о фактических гидрометеорологических воздействиях и технологических нагрузках;
- измерение и контроль действительного напряженного и деформированного состояния металлоконструкций;
- определение абсолютных и взаимных перемещений в элементах и узлах конструкций;
- уточнение фактических амплитуд колебаний при реальных динамических воздействиях и контроль изменения во времени амплитудно-частотных характеристик динамической работы конструкций;
- измерение параметров работы сооружения при экстремальных, в т.ч. сейсмических воздействиях.

Наблюдения должны обеспечить достаточную и статистически обоснованную информацию о функционировании объекта, особенно тех параметров конструкций, которые интегрально характеризуют эксплуатационную надежность сооружения и позволяют прогнозировать его безаварийную работу.

При планировании натурных наблюдений решаются следующие научные и организационно-технические задачи: выбор критериев оценки эффективности инструментальных наблюдений; разработка методического обеспечения экспериментальных работ; разработка и выбор видов, объемов и последовательности этапов наблюдений и состав контролируемых параметров (разработка программы); разработка алгоритмов оперативной и полной обработки результатов измерений, методов прогнозирования технического состояния наблюдаемого объекта, выбор формы представления и критериев оценки результатов наблюдений; планирование материально-технического и организационного обеспечения. Поскольку натурные наблюдения сложных конструкций представляют собой совокупность статистических экспериментов, то при их проведении значительное место должны занимать научные направления, связанные с теорией вероятности и математической статистики.

Характерной особенностью натурных инструментальных наблюдений является то, что создание специальных испытательных воздействий и нагрузок для их проведения крайне затруднено, а в большинстве случаев – невозможно. Поэтому они являются не столько испытаниями, сколько фиксацией действительных параметров работы конструкций и сооружения в целом при технологических и монтажных операциях, а также в природных эксплуатационных условиях, где время появления и интенсивность воздействий носят случайный, а не заданный характер. Таким образом, экспериментальные работы при наблюдениях можно рассматривать как разновидность натурных испытаний. Отличие в методиках их проведения заключается в системах нагружения, специальных требованиях к приборному оснащению и продолжительности измерений.

Принятая методика наблюдений включает три локальных критерия: достоверность получения информации; продолжительность получения результатов наблюдений (измерений) и стоимость получения измерительной информации.

Критерием оценки параметров функционирования объекта наблюдений является сопоставление результатов наблюдений с расчетно-теоретическими предпосылками. При этом возможны два метода (подхода): *прямой*, заключающийся в том, что контроль параметров работы конструкции ведется непосредственно по измеряемой (наблюдаемой) величине, например, по напряжениям в отдельных наиболее ответственных элементах несущих конструкций, и *косвенный*, когда о контролируемых характеристиках судят по измеряемым параметрам, функционально связанным с контролируемыми. В качестве примера можно привести наблюдения, связанные с оценкой жесткости конструкции по изменению частоты собственных колебаний.

Комплексные наблюдения, как правило, включают оба метода.

В практике наблюдений механизм оценки параметров действительной работы конструкций строится на предположении, что система «нагрузка-реакция» данной конструкции – линейна или известен закон этой зависимости. Применяя принцип суперпозиции, можно в каждом отрезке времени зафиксировать условия, в которых находится сооружение, зарегистрировав всю совокупность внешних воздействий (нагрузок) и суммарную реакцию на них конструкций. Таким образом, можно получить исходные данные для поверочного расчета по принятой при проектировании расчетной схеме. Если результаты расчета совпадают с экспериментальными данными, можно говорить о соответствии действительной работы сооружения теоретической модели и оценить эксплуатационную надежность. Достоверность полученной информации определяется объемом статистически обоснованных данных при различных сочетаниях и величинах входных параметров.

Техническая диагностика включает в себя методы организации и принципы построения средств оценки состояния объектов техники. Особый интерес к технической диагностике строительных объектов вызван появлением сложных конструкций, работающих в условиях интенсивных, часто экстремальных, динамических нагрузок и воздействий, а также повышенными требованиями к их эксплуатационной надежности. В этих условиях простейшие методы и визуальные средства определения технического состояния сложных строительных объектов оказываются малоэффективными и в ряде случаев не позволяют предотвратить аварийные ситуации.

Задачи диагностики сводятся к определению технического состояния здания или сооружения в прошлом, состояния конструкций в настоящий момент времени и прогнозированию поведения сооружения в будущем, например, при оценке ресурса работы. Ее объектами в первую очередь должны быть сооружения, работающие на динамическую нагрузку, и конструкции, имеющие ограниченный ресурс усталостной прочности. Одним из наиболее распространенных видов технической диагностики является виброакустическая диагностика, предполагающая использование методов и средств организации процессов распознавания состояния конструкций по исходной информации, содержащейся в виброакустическом сигнале.

Различают системы тестового и функционального диагностирования. Отличительной особенностью тестового диагностирования является возможность подачи на объект специальных воздействий. Такие системы обычно решают задачи проверки целостности, работоспособности и поиска дефектов конструкций. В системах функционального диагностирования подача специальных воздействий не предусматривается. Диагностика выполняется только по рабочим (эксплуатационным) нагрузкам и воздействиям, предусмотренным алгоритмом функционирования объекта.

Разновидностью виброакустической диагностики является вибрационный контроль, основанный на периодических измерениях параметров вибрации и исследовании их изменения в процессе эксплуатации объекта. Такой контроль особенно важен если диагностируемая конструкция работает в экстремальных условиях (повышены уровни вибрации, перепады температур, давлений и др.). В последние годы широкое распространение получил метод активного вибрационного воздействия на конструкцию, по реакции которой судят о ее состоянии. Применение этого метода вибрационного контроля и диагностики основано на наличии корреляционной зависимости динамических характеристик конструкции от прочности и жесткости узловых соединений. В таких случаях рассматривается приведенная жесткость элементов конструкций совместно с присущими им динамическими характеристиками, искусственно создаваемыми частотами и амплитудами резонансных колебаний, показателями демпфирования, импедансными и фазовыми соотношениями.

Доминирующим критерием диагностики многих сооружений являются их динамические свойства, выступающие в качестве интегральных оценок состояния. К ним относятся собственные частоты, формы и логарифмические декременты пространственных колебаний, параметры вынужденных колебаний в поле внешних сил. Широкое распространение могут получить также критерии, оценка которых дифференцируется поэлементно в результате выполнения комплекса инструментальных измерений, а именно: измерения перемещений несущих элементов конструкций в вертикальной и горизонтальной плоскостях под действием силовых факторов, в т.ч. метеорологического воздействия, что позволяет определить фактическую пространствен-

ную жесткость и деформативность элементов и сооружения в целом; измерение усилий и напряжений в узлах и элементах; геометрические измерения пространственного положения элементов и узлов сооружений.

При вибрационном контроле строительных конструкций наиболее эффективен метод сличения спектров частот колебаний. Появление во временных реализациях и спектрах дополнительных составляющих указывает на наличие дефектов: трещины, расстройство узлов соединения, выход из строя элементов конструкций и др. При сравнении спектра «эталонных» дефектных зон со спектрами, полученными при исследовании реальных дефектов, можно определить также характер дефекта, возникшего в процессе эксплуатации.

Диагностическим признаком может быть не спектральное разложение динамического процесса, а интегральная характеристика дисперсии, определяемая в полосе частот от ω_1 до ω_2, в виде

$$D = \frac{1}{2\pi}\int_{\omega_1}^{\omega_2} G(\omega)\cdot d\omega ,$$

где G_ω – спектральная плотность мощности.

Перспективно при исследовании вибрационного состояния конструкций по случайным вибрационным шумам использовать автокорреляционную функцию. Функция автокорреляционного стационарного процесса $x(t)$ определяется как

$$K_{xx}(\tau) = \frac{1}{T-\tau_{\max}}\int_0^{T-\tau_{\max}} x(t)\cdot x(t+\tau)dt ,$$

где $\tau_{\max}$ – максимальное значение сдвига во времени; T – время наблюдений.

Если удается измерить сигналы $x(t)$ и $y(t)$ в нескольких точках конструкции, то в качестве диагностического признака используют максимальное значение коэффициента взаимной корреляции

$$\rho_{xy}(\tau) = K_{xy}(\tau)\sqrt{K_{xx}(0)K_{xy}(0)} .$$

Наиболее эффективно применение этого диагностического признака в том случае, если один из сигналов – входной (параметр нагрузки), а другой – выходной (реакция конструкции на эту нагрузку).

Новое направление исследований в области активного контроля и вибродиагностики – поиск дефекта конструкции как проявление нелинейных эффектов – основано на существовании корреляционных связей между нелинейной упругостью, с одной стороны, и дефектом, обусловленным нарушением целостности, появлением зазоров в соединениях, изменением усилий натяжения и т.д., с другой, приводящих к возникновению параметрических колебаний и резонансным эффектам.

Информационное обеспечение и измерительные системы. Система информационного обеспечения наблюдений, контроля и диагностики – это измерительно-информационный комплекс, в состав которого входят первичные преобразователи (датчики), регистраторы и накопители информации, вычислительные устройства с программно-математическими средствами обработки и анализа результатов измерений. Система должна обеспечивать информационный обмен от уровня первичных сигналов средств измерений до уровня параметров и критериев оценки наблюдаемых, контролируемых объектов. В общем случае – это многоуровневая система с иерархическим принципом построения. При ее формировании особое внимание обращается на частотные диапазоны контролируемых процессов, необходимый объем измерений и точностные показатели средств измерений и преобразования сигналов, а также на показатели надежности и достоверности результатов измерений.

Измерительные системы для долговременных натурных измерений и контроля, как правило, должны строиться на базе серийно выпускаемой промышленностью аппаратуры. Разрабатываемые специальные методы и средства измерений должны быть метрологически обеспечены, отвечать требованиям надежности и долговечности, дистанционности работы и автоматизации регистрации измеряемых параметров, ремонтоспособности, простоты монтажа и обслуживания.

Средства контроля диагностики подразделяют на аппаратуру непрерывного измерения и инспекционного контроля, периодически подключаемую к конструкциям.

При проектировании систем долговременных наблюдений и диагностического контроля предпочтение следует отдавать приборам, работающим по методу частотного преобразования входного параметра (частотный метод измерений). Измерительные частотные (струнно-акустические) преобразователи (датчики)

отвечают всем требованиям, предъявляемым к системам длительных наблюдений, главное из которых – возможность достижения больших точностей измерений за счет частотно-модулированного выходного сигнала преобразователя, в т.ч. при передаче сигнала по линиям связи.

В струнно-акустических преобразователях механических величин в электрические используется свойство стальной струны менять частоту собственных колебаний в зависимости от действующих в ней растягивающих усилий. Измеряя частоту колебаний струны в процессе наблюдений, можно подсчитать переданную на струну деформацию контролируемого элемента конструкции.

В качестве регистрирующих используются приборы КИПиА, отличающиеся высокой надежностью, простотой обслуживания, возможностью визуального и документального контроля измеряемых параметров, наличием сигнализирующего устройства о достижении измеряемых параметров заданного (опасного) уровня.

Наиболее эффективны системы измерений на базе компьютерной техники, которые обеспечивают полную автоматизацию процесса инструментальных наблюдений: сбор, регистрацию, обработку, накопление, представление, анализ и хранение измеряемой информации.

В процессе возведения и в период эксплуатационного контроля широко используются различные механические и электромеханические прогибомеры и индикаторы взаимных перемещений и общих деформаций, другие приборы контроля напряженно-деформированного состояния металлоконструкций, а также геодезические методы измерений геометрических характеристик конструкций.

Методы и средства оценки состояния конструкций. Анализ отказов современных строительных конструкций с точки зрения их силовой работы показывает, что в большинстве случаев разрушение или ограниченное повреждение связаны с возникновением и развитием дефектов типа несплошностей, трещин и др. В связи с участившимися случаями усталостных и хрупких разрушений представляется возможным значительно повысить эффективность технической диагностики, если в качестве параметров состояния материала выбрать параметры дефектов его структуры. Это обеспечит наиболее тесную связь параметров состояния с теми физическими процессами в материале, которые приводят к отказу конструкции.

Определенную роль в решении задач диагностики по оценке состояния конструкционных материалов играют методы и средства дефектоскопии, с помощью которых выявляются дефекты типа несплошностей (раковин, пор, расслоения, трещин и т.п.) и изменения структуры материала. Однако эти методы основаны на локальных параметрах, передающих информацию о состоянии объекта с относительно небольших поверхностей конструкций. Сплошное обследование с помощью дефектоскопии на современном этапе развития методов и средств измерений требует громоздких систем измерений, не поддающихся, как правило, автоматизации. Кроме того средства дефектоскопии наиболее приспособлены для решения простейшей задачи разделения объекта контроля по признаку «годен–не годен», не выявляя отличий в характере дефектов.

На основе концепций технической диагностики сооружений для оценки (измерения) параметров дефектов структуры материала необходимо в качестве диагностических сигналов выбирать характеристики тех физических процессов, которые сопровождают развитие дефектов, а именно: процессы изучения волн напряжений, обусловленные возникновением и развитием дефектов структуры материала. Это явление получило название акустической эмиссии или эмиссии волн напряжений. Измерение параметров указанных волн позволяет обнаруживать различные дефекты, оценивать их размеры, степень опасности, прогнозировать разрушающую нагрузку и ресурс. В металлах, обладающих слабым затуханием ультразвука, один преобразователь может обслуживать зону радиусом более десяти метров и обнаруживать волны напряжений, возбуждаемые глубоко внутри материала. Эти преимущества, а также высокая чувствительность, оперативность, возможность определения координат дефектов позволяют использовать параметры акустической эмиссии в качестве эффективных диагностических характеристик как всего сооружения, так и элементов и узлов конструкций.

Надійшла 27.08.2015 р.

ДЕЙСТВИТЕЛЬНАЯ РАБОТА ВАНТОВОГО АВТОДОРОЖНОГО МОСТА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РЕАЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

З.А. Шульман
технический директор
корпорации «Промстальконструкция»,
к.т.н., г. Днепропетровск

Имеющиеся преимущества вантовых конструкций предопределяют технико-экономическую целесообразность их применения в мостах больших пролетов, где легкость несущих конструкций приобретает особо важное значение. Отрицательной особенностью вантовых мостов является их пониженная жесткость по сравнению с мостами других систем, что обусловлено высокими напряжениями, допускаемыми в вантах от временной нагрузки, пониженным модулем упругости некоторых типов вант, значительной их длиной в мостах больших пролетов, а также провисанием.

Современный уровень развития знаний в области аэродинамики не позволяет чисто теоретическими средствами выявить все особенности динамического поведения висячих мостов сложной формы, в т.ч. находящихся в ветровом потоке. Между тем зарегистрированы случаи их разрушения в результате воздействия резонансных колебаний, возникающих от сильного ветра, при пропуске потока людей, идущих в ногу, других динамических воздействий. Поэтому при проектировании висячих мостов большое внимание уделяют динамическим и аэродинамическим экспериментам и исследованиям. Модели целых мостов или их фрагменты тщательно испытывают в аэродинамических трубах.

Для поддержания эксплуатационной надежности конструкций вантовых мостов осуществляются периодические испытания, измерения силовых и геометрических параметров несущих элементов, в первую очередь, усилий в элементах вантовой системы. Крупные мостовые сооружения оснащаются автоматизированной системой инструментального мониторинга параметров работы сооружения. В настоящее время создание диагностических методов оценки технического состояния мостов, в т.ч. с вантовой системой, является актуальной задачей.

ОАО ЦНИИС разработаны «Методические рекомендации по вибродиагностике автодорожных мостов», предназначенные для периодической инструментальной диагностики эксплуатируемых и приемочных испытаний вновь построенных автодорожных, в т.ч. вантовых, мостов. Вибродиагностика базируется на анализе параметров расчетного и экспериментального откликов (реакции) сооружения на динамическое воздействие в низкочастотном диапазоне собственных форм колебаний.

Методология и основные подходы к разработке программы экспериментальных исследований поведения моста при реальных динамических воздействий изложены на примере вантового автодорожного моста через р. Даугаву в г. Риге (первое название «Горьковский»), приведены основные результаты этих исследований. Целью проведения натурных экспериментальных работ было определение динамических характеристик моста и усилий в канатах вантовой системы, что потребовало разработки специальной измерительной системы, в т.ч. методов и приборов для измерений усилий в вантах руслового пролетного строения моста и частот их колебаний в реальном ветровом потоке, а также выбор способов спектрального анализа измеренных параметров колебаний сооружения.

При сдаче сооружения в эксплуатацию действительные динамические характеристики были получены в недостаточно полном объеме и проанализированы с недостаточной степенью корректности. В частности, из записей вертикальных колебаний пролетного строения не идентифицированы формы колебаний пролетного строения и пилона в вертикальной продольной плоскости моста, хотя эти динамические характеристики служат надежной основой диагностики состояния сооружения в процессе длительной эксплуатации. Кроме того, как в период сдачи моста в эксплуатацию, так и в предшествующий ему не измерялись усилия в вантах, величина которых влияет на параметры колебаний вантового пролетного строения и по изменениям которых можно судить о происшедших за тот период эксплуатации релаксационных процессах в них.

Мост введен в эксплуатацию в 1981 г. На момент открытия это был самый длинный вантовый мост в Европе (рис. 1).

© Шульман З.А.

По мосту осуществляется двустороннее троллейбусное и автомобильное, а также пешеходное движение. Мостовой переход состоит из вантового однопилонного моста с главным пролетом 312 м, левобережного пролета 89,9 м и правобережной эстакады (87,5 + 64,6) м. Вантовое пролетное строение моста имеет общую длину 554 м, схему 89,9 + 312 + 87,5 + 64,6 и перекрывает 4 пролета между опорами № 1 и № 5. Вантовая схема асимметричная – однопилонная с одной центральной плоскостью расположения вант.

Между пролетами 89,90 м и 312,00 м расположен А-образный железобетонный пилон высотой 108 м. Фундаментом ему служит высокий ростверк на 52 буровых железобетонных столбах диаметром по 1,7 м, заглубленных в толщу доломитов. В сторону берега от верха пилона уходят 25 вант, закрепленных в устье-противовесе, в сторону русла – 24 ванты, собранные в четыре луча по 5, 5, 8 и 6 вант считая от пилона. На пилоне ванты прерываются. Канаты заделаны в стальные анкеры, один из которых упирается в тело пилона, а другой – в конструкцию балки пролетного строения.

Стальная балка жесткости вантового пролетного строения представляет собой неразрезную четырехпролетную систему, защемленную на левобережном устье и опирающуюся в остальных четырех точках на продольно-подвижные опорные части (рис. 2).

В поперечном сечении балка жесткости – замкнутая четырехстенчатая коробка с тротуарными консолями в уровне верхнего пояса.

Рис. 1. Автодорожный вантовый мост через р. Даугава в г. Риге. Автор проекта Г.Б. Фукс (ПАО «Киевсоюздорпроект»)

Вантовое пролетное строение предназначено для пропуска 4-х полос автомобильной нагрузки. Для пешеходной зоны предназначены двухсторонние тротуары шириной по 3 м, отделенные от проезда барьерными ограждениями. Полная ширина моста составляет 28,14 м.

Программа экспериментальных исследований, составленная с учетом предложений автора проекта, включала:

- определение динамических характеристик сооружения и отдельных его элементов;

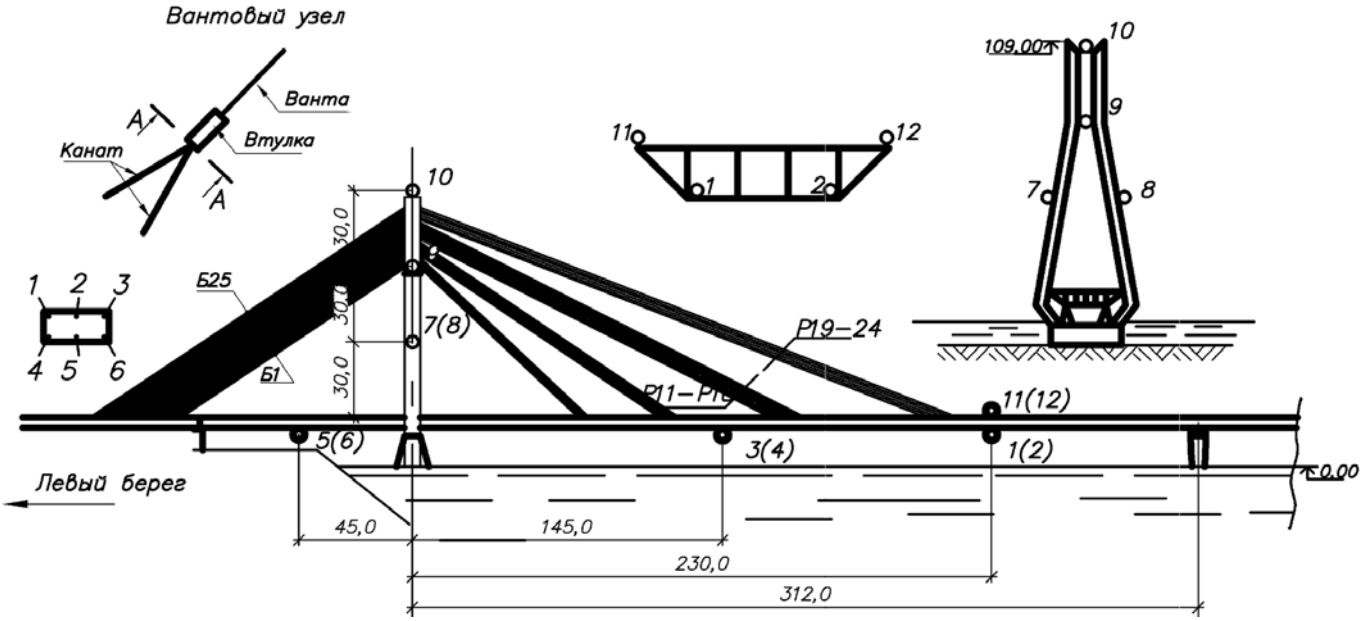


Рис. 2. Схема моста и расстановки измерительных приборов

- изучение реакции сооружения на три вида динамических воздействий: подвижной проектной нагрузки, ветра и пешеходов;
- уточнение действительных значений усилий в выборочной группе вант и анализ изменений этих значений за семь лет эксплуатации моста.

Испытаниям предшествовал предварительный осмотр металлических конструкций пролетного строения и пилона. Для проведения экспериментальных работ была разработана измерительная система, обеспечивающая получение экспериментальных данных о параметрах внешних воздействий и реакции на них сооружения.

Параметры колебаний руслового пролетного строения и пилона из-за воздействия ветра, движущегося автотранспорта и потока пешеходов измерялись специально разработанной виброизмерительной системой, включающей: вибродатчики сейсмического типа С5С, шунтовую коробку, блок формирования характеристик вибродатчика БФХ и магнитоэлектрический осциллограф, укомплектованный интегрирующими гальванометрами.

Контроль скорости и направления ветрового потока осуществлялся: на пролетном строении – анеморумбометром типа М47, на оголовке пилона – сигнальным анемометром типа М95.

Усилия в пучках канатов определялись геодезическим методом измерений, основанным на измерении стрелы провисания канатов с помощью 2-секундного теодолита. В соответствии с этой методикой усилия в пучке канатов (ванте) определялись по следующей аналитической зависимости (рис. 3):

$$N = H/\cos\beta; \qquad H = ql^2/(8f),$$

где N – усилие в пучке канатов; H – горизонтальный распор; q – погонная масса пучка канатов; l – проекция длины каната на горизонтальную ось; f – провис пучка канатов; α – измеряется после построения касательной; β_0 – угол наклона пучка канатов; S – расстояние от центра теодолита до нижней точки каната; φ – угол между касательной в точке измерения усилия и линией, соединяющей концы отрезка каната; $\beta = \beta_0 - \varphi$ в нижней точке; $\beta = \beta_0 + \varphi$ – в верхней.

Усилия в отдельных канатах вантовой системы моста измерялись накладным динамометром системы ЛИИЖТа.

Колебания вант в ветровом потоке регистрировались вибродатчиком типа ОСП и счетчиком импульсов, синхронизированным с электросекундомером.

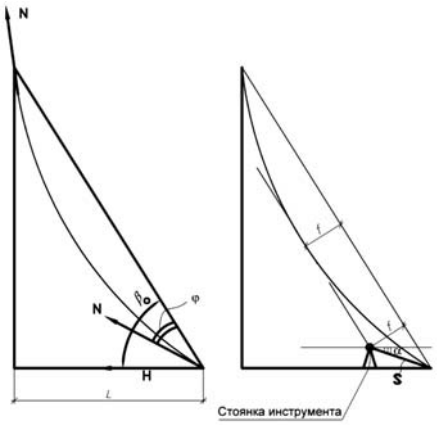


Рис. 3. Схема определения усилия в пучке канатов

Исследование метрологических характеристик средств измерений дало основание считать, что полученные составляющие суммарных погрешностей измерений обеспечивали достоверность определения динамических характеристик конструкций и усилий в вантовой системе, определяющих действительные параметры динамической работы пролетного строения моста. Их величины составляли: погрешности определения частот колебаний – 0,1 %, амплитуд колебаний – 10 %, абсолютная погрешность спектрального анализа – 0,04… 0,05 Гц, погрешность измерений усилий в вантах – 7 %.

Программа испытаний формировалась таким образом, чтобы выявить раздельное влияние каждого из перечисленных факторов временного воздействия на динамическое поведение моста. Содержание этой программы в части видов воздействий, числа и времени регистрации (реализации записей колебаний) нашло отражение в таблице 1.

Таблица 1

Общие сведения об организации динамических испытаниях моста

Серия опытов	Кол-во опытов (реализаций) в серии	№ датчиков (рис. 2)	Вид воздействия	Характеристика колебательных процессов	Время реализации (мин)
1	7	1...5; 10	Автодвижение	Колебания в плоскости моста	5
2	2	1, 2, 5, 6, 11, 12	То же	То же	7
3	2	1...5; 9	Ветер, автодвижение	То же	12
4	4	1, 4...9, 10	То же	То же	6
5	2	1, 4...9, 10	Ветер	То же	5
6	5	1, 4...9, 10	Толпа	То же	5
7	2	1, 4...9, 10	Ветер	Колебания из плоскости моста	8
8	2	1, 3, 5, 7, 9, 10	Ветер	То же	3

Колебания элементов конструкций возбуждались реальными потоками подвижной автомобильной нагрузки в часы пик, естественным ветровым потоком и реальными потоками движущихся пешеходов во время праздничной демонстрации.

Как показали результаты выполненных экспериментов, временная нагрузка, вызванная неупорядоченным движением транспорта, практически не отражается на значениях собственных частот колебаний моста. Отметим также, что при указанной плотности потока пешеходов частоты собственных колебаний сооружения практически не изменяются. Кроме того, их движение вызывает колебания пролетного строения только по одной или нескольким низким собственным формам.

Результаты обработки записей колебаний вантового пролетного строения и пилона позволили получить следующие основные спектральные характеристики реализованных динамических процессов, характеризующих поведение моста при реальных, зафиксированных в процессе выполнения экспериментальных работ, нагрузках и воздействиях: математическое ожидание; дисперсию; среднее квадратичное отклонение; частоты и соответствующие им максимальные амплитуды колебаний.

Наиболее характерные осциллограммы и спектральные характеристики колебательных процессов приведены на рис. 4 и рис. 5 соответственно.

Детальный анализ всех спектрограмм в части определения спектра частот и соответствующих им амплитуд колебаний в порядке доминирования энергии колебательных процессов приведен в таблице 2. С помощью анализа осциллограмм представляется возможным, с учетом амплитудно-частотной характеристики разработанной виброизмерительной аппаратуры, идентифицировать низшие формы колебаний при различных воздействиях. Это, в свою очередь, позволило сравнить расчетные значения динамических параметров, полученных в ряде проектных и научно-исследовательских организаций, с экспериментальными данными (табл. 3.).

Заслуживает внимания факт соответствия низшей формы преимущественным колебаниям пилона в плоскости моста. Этим обстоятельством объясняется отсутствие собственных колебаний данной формы в расчетах института «Днепрпроектстальконструкция», где в качестве расчетной схемы применялась многопролетная балка на упруго-податливых опорах и влияние пилона не учитывалось.

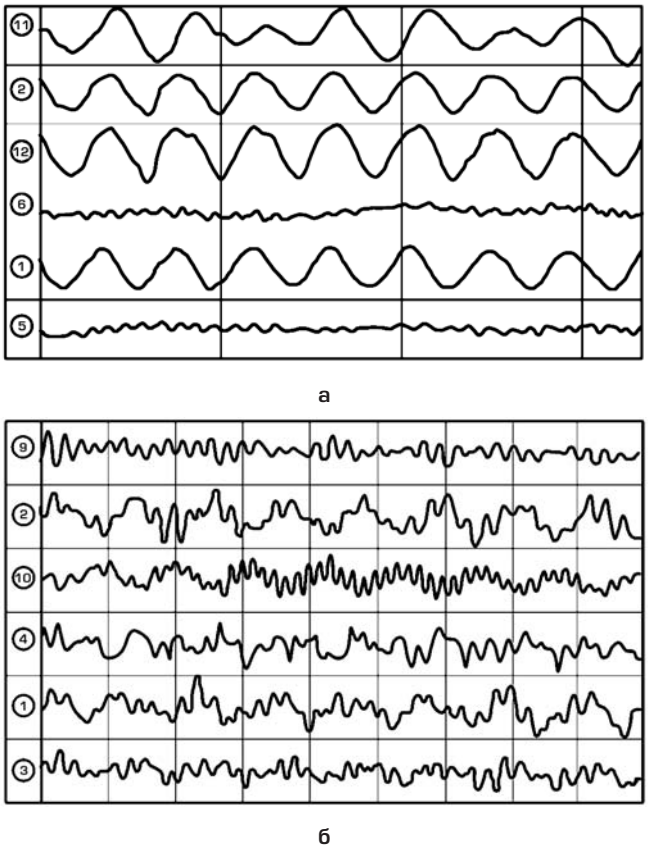


Рис. 4. Фрагмент записи колебаний пролетного строения:
а,б – в плоскости моста при движении автотранспорта и потока пешеходов соответственно

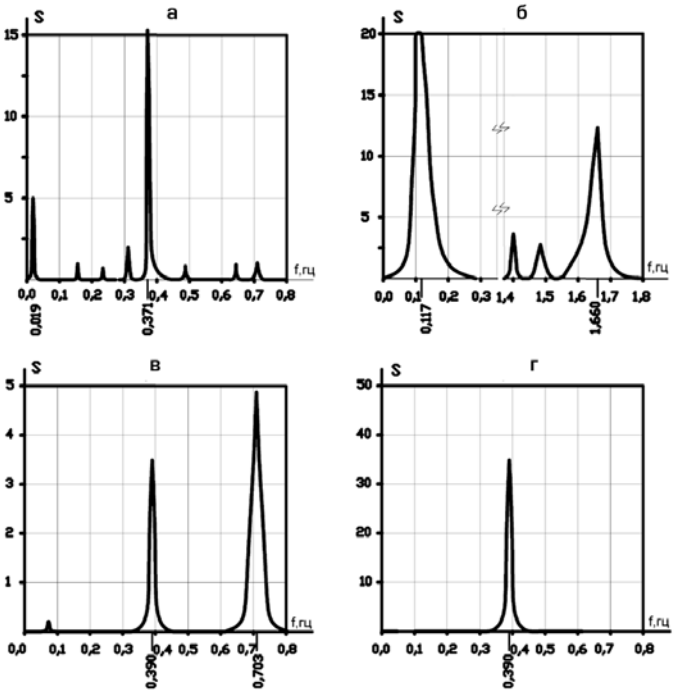
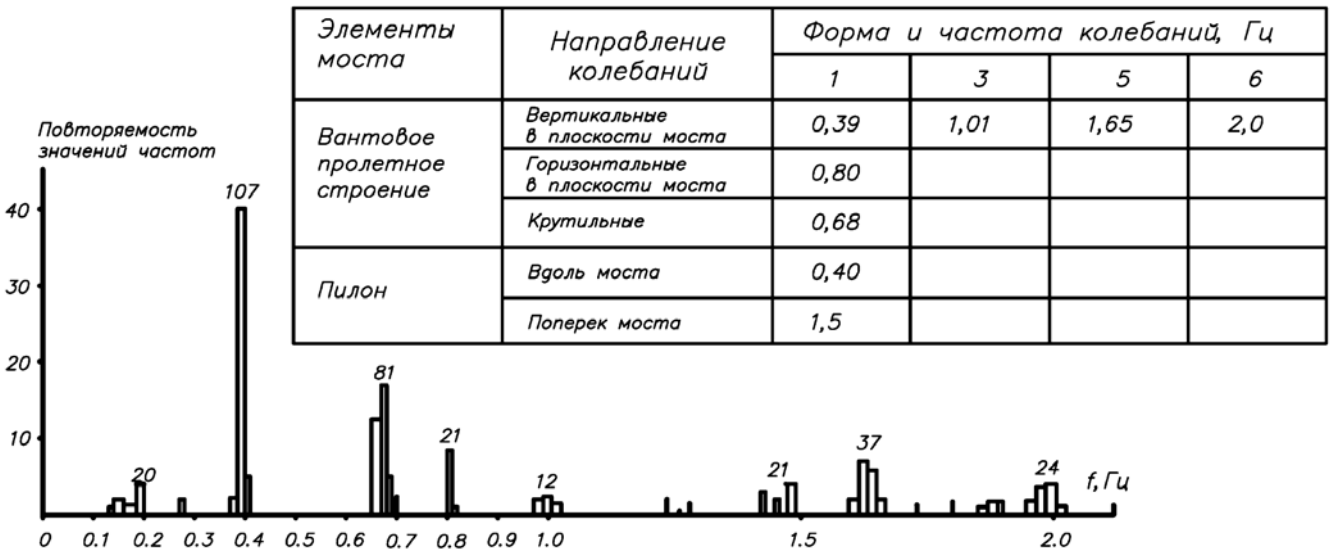


Рис. 5. Частотный спектр колебаний, измеренных:
а – в точке 1; **б** – в точке 5; **в** – в точке 9; **г** – в точке 10

Таблица 2

Выборочные значения частот и амплитуд колебаний

Серия опытов	Вид воздействия	Характеристика колебательных процессов	№ датчиков	Результаты измерений					
				Основной тон		Второй тон		Высшие тона	
				f, Гц	*A*, мм	*f*, Гц	*A*, мм	*f*, Гц	*A*, мм
№1 Всего реализаций 9	Автодвижение	Колебания в плоскости моста	1	0,39	0,278	–	–	–	–
			2	0,39	0,27	–	–	–	–
			5	0,156	0,07	1,484	–	1,679	–
			6	0,156	0,09	1,484	–	–	–
			11	0,39	0,227	0,664	–	–	–
			12	0,39	0,315	0,703	–	–	–
№2 Всего реализаций 16	Автодвижение + ветер	Колебания в плоскости моста	1	0,40	0,228	–	–	–	–
			2.	0,40	0,249	–	–	–	–
			3	0,40	0,114	0,693	–	–	–
			4	0,40	0,128	0,693	–	0,712	–
			5	0,175	0,067	–	–	–	–
			9	0,40	0,016	0,732	–	0,693	–
№3 Всего реализаций 7	Ветер 10...12 м/с	Колебания в плоскости моста	1	0,39	0,048	–	–	–	–
			2	0,39	0,052	–	–	–	–
			3	0,371	0,025	1,562	0,028	2,4	–
			4	0,39	0,012	1,66	0,023	1,99	–
			9	1,66	0,0057	0,39	–	1,914	–
			10	0,39	0,008	2,636	–	–	–
№4 Всего реализаций 19	Толпа. Частота шага – 1,7... 1,9 Гц, плотность потока 70... 140 кг/м^2	Колебания в плоскости моста	1	0,39	0,038	0,644	0,034	0,8	0,027
			2	0,39	0,041	0,0664	0,039	0,8	0,029
			3	0,781	0,04	1,64	0,042	0,664	0,04
			4	0,664	0,047	1,64	0,044	0,8	0,039
			9	1,66	0,01	1,972		0,683	
			10	0,39	0,007	1,445			
№5 Всего Реализаций 6	Ветер 8–13 м/с	Колебания из плоскости моста	1	0,664	0,0034	0,8		0,39	
			3	0,664		0,39		0,8	
			5	1,503		0,664		0,8	
			7	1,406	0,0023	1,503		0,664	
			9	1,503		1,406		0,664	
			10	1,484	0,013	0,39		1,367	



Элементы моста	Направление колебаний	Форма и частота колебаний, Гц			
		1	3	5	6
Вантовое пролетное строение	Вертикальные в плоскости моста	0,39	1,01	1,65	2,0
	Горизонтальные в плоскости моста	0,80			
	Крутильные	0,68			
Пилон	Вдоль моста	0,40			
	Поперек моста	1,5			

Рис. 6. Динамический паспорт (спектр колебаний) вантового моста через р. Даугава

Таблица 3

Сравнение расчетных и экспериментальных значений динамических параметров

Вид колебаний	Форма колебаний	Расчетные значения				Экспериментальные значения	
		ДнепрПСК		ЦНИИС			
		T, с	*f*, Гц	*T*, с	*f*, Гц	*T*, с	*f*, Гц
Вертикальные	1	–	–	2,23	0,448	2,56	0,39
	2	0,615	0,619	1,74	0,575	–	–
	3	0,946	1,057	0,96	1,042	0,99	1,01
	4	0,834	1,198	0,77	1,299	–	–
	5	0,654	1,529	0,61	1,639	0,61	1,65
	6	0,566	1,768	0,52	1,923	0,50	2,0
	7	0,472	2,118	0,44	2,273	0,45	2,23
	8	–	–	0,36	2,778	0,38	2,63
	9	–	–	0,32	3,125	–	–
Горизонтальные	1	1,641	0,61	0,96	1,042	1,25	0,8
	2	0,41	2,44	0,34	2,941	–	–
	3	0,182	5,491	0,18	5,556	–	–
	4	0,102	9,756	0,12	8,333	–	–
Крутильные	1	0,752	1,331	–	–	1,47	0,68
	2	0,376	2,661	–	–	–	–
	3	0,251	3,992	–	–	–	–
	4	0,188	5,332	–	–	–	–

В ходе анализа результатов испытаний получен спектр частот колебаний моста (рис. 6), который можно рассматривать как динамический паспорт сооружения. Численные значения экспериментально полученного спектра частот колебаний моста в этом случае принимаются в качестве исходных данных при интегральном анализе состояния сооружения в процессе длительной эксплуатации, т.е. мониторинге технического состояния моста.

Анализ осциллограмм в части наличия сдвига фазы колебаний в точках *1*, *3* и *11* пролетного строения по отношению к колебаниям в точках *2*, *4*, *12* и *7*, *9*, *10* позволяет с известной степенью достоверности предположить наличие в исследуемом сооружении локального источника поглощения энергии в виде нарушения контакта асфальтобетонного слоя со стальным ортотропным настилом верховой стороны пролетного строения (см. рис. 4).

Диссипативные свойства пролетного строения оцениваются по известной методике при анализе участков осциллограмм, соответствующих затухающим процессам колебаний после прохождения по пролетному строению автотранспорта или пешеходов.

Вычисленные значения логарифмического декремента колебаний находятся в интервале $\delta = 0{,}025...0{,}04$. Меньшие значения относятся к крутильным колебаниям и колебаниям из плоскости моста, а большие – к колебаниям в плоскости моста, что можно объяснить, в основном, колебаниями железобетонного пилона.

Выполненные экспериментальные исследования (динамические испытания) и их детальный анализ позволили сформулировать следующие основные выводы.

1. Колебания элементов конструкций моста, вызванные эксплуатационными динамическими воздействиями, можно отнести к умеренным, не вызывающим опасений с точки зрения усталостной прочности. Исключение составляют наблюдаемые вибрации вант двух средних лучей при действии подвижной нагрузки, влияющие на усталостный ресурс как проволок, так и оплетки.

2. При имевшей место плотности потока пешеходов частоты собственных колебаний сооружения практически не изменяются от частоты шага людей на мосту. Кроме того, такое движение вызывает колебания пролетного строения только по одной или нескольким низшим собственным формам.

3. Спектральные характеристики колебаний пролетного строения, полученные в результаты эксперимента, можно рассматривать как динамический паспорт сооружения и принимать его за основу динамической интегральной оценки (диагностики) и анализа состояния сооружения в процессе длительной эксплуатации.

Надійшла 04.11.2015 р.

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АНТЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ БАШЕННОГО ТИПА

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

Исходя из многолетнего опыта проектирования, строительства, реконструкции, испытаний, технической диагностики и долговременных инструментальных наблюдений антенно-мачтовых сооружений, автором предложен принципиально новый подход к решению проблемы эффективной организации работ по эксплуатации сооружений связи, а именно: выполнение всего комплекса работ по единому проекту.

Основной частью данного проекта является создаваемая с учетом конструктивных особенностей и условий эксплуатации сооружения проектная документация на систему инструментального и визуального контроля состояния конструкций, а также долговременных наблюдений (мониторинга) за поведением сооружения в эксплуатационных условиях (далее – проект эксплуатации). По их результатам оценивается и диагностируется техническое состояние конструкций, решаются вопросы содержания сооружения.

Комплекс (система) инструментальных наблюдений за параметрами работы сооружения (т.н. система мониторинга) является разделом проекта эксплуатации, который составляется на базе действующих нормативных и инструктивных ведомственных документов с применением современных приборов и автоматизированной системы сбора, обработки, представления, анализа и хранения информации. Кроме того, в его составе разрабатываются инструктивные материалы по планированию, проведению и контролю ремонтно-профилактических работ, направленных на обеспечение надежной и долговечной эксплуатации сооружения.

Система мониторинга разрабатывается по нормам проектирования автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУТП) и включается в качестве подсистемы в автоматизированную систему управления технической эксплуатацией радиотелевизионного передающего центра или базовых станций мобильной связи.

Таким образом решается главная задача – эксплуатация опор связи по единому организационно-техническому проекту, являющемуся основой организации их эффективной эксплуатации.

Кроме того, перед разработчиками системы мониторинга ставится, как правило, еще одна задача: получение исходных данных для решения вопроса о необходимости установки на башне динамических гасителей колебаний (ДГК) и, в случае положительного решения, обеспечение авторов проекта полученными экспериментальным путем статистически обоснованными динамическими характеристиками сооружения (частоты и формы колебаний).

При разработке системы мониторинга руководствуются следующими нормативами:

- ДБН В.1.2-5:2007 «Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Науково-технічний супровід будівельних об'єктів»;
- ДСТУ Б В.2.6-25-2003 «Конструкції будинків і споруд. Автоматизовані системи технічного діагностування будівельних конструкцій. Загальні технічні вимоги».

Основными частями проекта являются:

- общесистемные решения, оценка предельных величин параметров работы сооружения, техническое задание на выполнение проектных работ;
- информационное обеспечение системы, методы и средства измерений;
- разработка технической документации на приборное оснащение башни системой контроля и долговременных наблюдений (мониторинга);
- программное обеспечение;
- организационное обеспечение создания и функционирования системы мониторинга.

© Шульман И.З.

Методологическая основа разработки системы мониторинга базируется на специфике выполнения этих работ, характерной особенностью которых, как известно, является то, что для их проведения не требуется создание специальных испытательных воздействий.

Критерием оценки параметров функционирования объекта мониторинга – башни принят прямой метод, основанный на сопоставлении результатов наблюдений с расчетно-теоретическими предпосылками. При этом возможны два метода (подхода).

Первый метод. В практике наблюдений механизм оценки параметров действительной работы конструкций строится на предположении, что система «нагрузка-реакция» данной конструкции является линейной или известен закон этой зависимости. Применяя принцип суперпозиции, можно на каждом отрезке времени зафиксировать условия, в которых находится сооружение, зарегистрировав всю совокупность внешних воздействий (нагрузок) и суммарную реакцию на них конструкции. Таким образом, можно получить исходные данные для поверочного расчета по принятой при проектировании расчетной схеме. Если результаты расчета совпадают с экспериментальными данными, можно делать вывод о соответствии действительной работы сооружения теоретической модели и в общем случае оценить эксплуатационную надежность конструкции. Достоверность полученной информации определяется объемом статистически обоснованных данных при различных сочетаниях и величинах входных параметров.

Другим критерием является *виброакустическая диагностика*, предполагающая использование методов и средств организации процессов распознавания состояния конструкций по исходной информации, содержащейся в виброакустическом сигнале.

Разновидностью виброакустической диагностики, на базе которой строится система мониторинга башни, является вибрационный контроль состояния объекта, основанный на периодических измерениях параметров вибрации и исследовании их изменения в процессе эксплуатации объекта. Вибрационный контроль особенно важен в том случае, когда диагностируемая конструкция работает в экстремальных условиях, в данном случае при повышенных величинах ветрового давления и пульсации ветра, перепадах температур, возможных сейсмических воздействиях и др.

В качестве диагностического признака в проекте используется спектральное разложение динамического процесса, а интегральная характеристика – дисперсия, определяемая в полосе частот от ω_1 до ω_2 в виде:

$$D = \frac{1}{2\pi}\int_{\omega_1}^{\omega_2} G(\omega)\cdot d\omega ,$$

где G_ω – спектральная плотность мощности.

Наиболее эффективно применение этого диагностического признака если один из сигналов – входной (параметр нагрузки), а другой – выходной (реакции конструкции на эту нагрузку).

Система мониторинга реализована при разработке проектов эксплуатации уникальных башенных сооружений связи высотой 250–350 м Рижского, Ташкентского, Алмаатинского и Новороссийского радиотелевизионных центров, [1, 2, 3], а также типовых опор ВЭУ и ряда опор базовых станций мобильной связи.

Ниже приведен разработанный автором проект системы инструментального мониторинга башни высотой 261 м. Сооружение состоит из двух частей – железобетонного цилиндрического ствола высотой 160 м и металлической антенной части переменного сечения – 101 м. Башня расположена на круглой в плане железобетонной плите диаметром 15 м (рис. 1).

Основные радиотелевизионные антенны, геометрические и весовые характеристики которых оказывают наибольшее влияние на аэродинамику сооружения, расположены на металлической части ствола башни.

Район расположения башни характеризуется периодическим возникновением ветра разрушительной силы, носящим название Бора, преимущественно северо-восточного направления. В среднем Бора активен 48 дней в году, чаще всего наблюдается в марте. Продолжительность ветра колеблется от 1 до 3 дней, максимальная зарегистрированная скорость – 56 м/с.

Таким образом, основным критерием оценки технического состояния башни является реакция сооружения на значительные по величине, в т.ч. экстремальные, ветровые воздействия, являющиеся основной расчетной нагрузкой и определяющие усталостную прочность и долговечность конструкции башни. Эти же критерии являются определяющими при решении вопроса о необходимости оснащения башни динамическими гасителями колебаний.

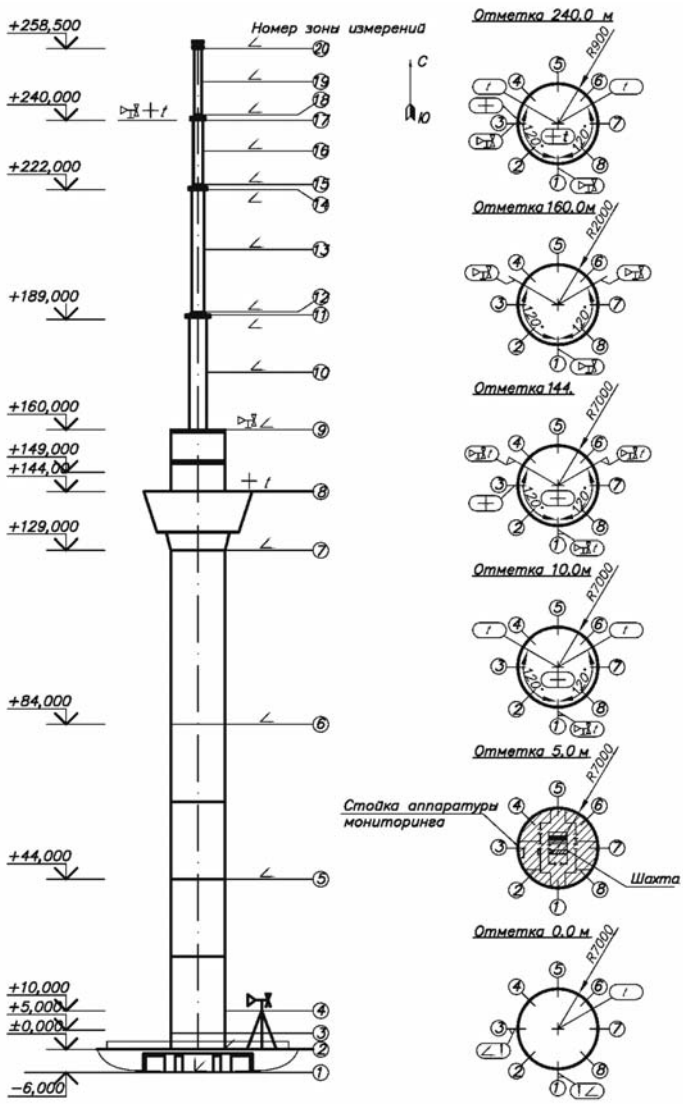


Рис. 1. Общий вид башни и схема расположения измерительных приборов

Для получения статистически обоснованной информации о реальных ветровых и других природных воздействиях, параметрах поведения, контроля и диагностирования технического состояния конструкций системой мониторинга предусмотрено автоматизированное измерение следующих представительных параметров, интегрально характеризующих эксплуатационную надежность и долговечность сооружения:

- скорости и направления ветра в уровнях 10, 140, 240 м;
- изгибных колебаний железобетонного ствола и антенной части башни;
- положения башни в пространстве (отклонение оси от вертикали);
- деформаций (осадок) фундамента;
- распределений по высоте температуры конструкций;
- данных обмеров, выявленных при осмотрах дефектов и повреждений.

Оснащение башни системой мониторинга показано в таблице 1.

Таблица 1

Наименование измеряемого параметра		Пределы измерений	Кол-во каналов
Горизонтальные колебания ж/б ствола башни*	Частота	От 0,1 до 6 Гц	2
	Амплитуда	От 2 до 200 мм	
Горизонтальные колебания антенной башни*	Частота	От 0,1 до 6 Гц	2
	Амплитуда	От 10 до 1000 мм	
Параметры ветра*	Скорость	От 0,2 до 60 м/с	6
	Направление	От 1 до 360 градусов	
Температура бетона и металоконструкций*		От −40 °С до +70 °С	9
Раскрытие трещин и зазоров ж/б ствола башни**		От 0,3 до 3 мм	
Осадка фундамента**		От 0,1 до 5 мм	
Сейсмоколебания основания башни**			
Пространственное положение башни**		От 2 до 260 мм	
Примечания: * Автоматический ввод результатов измерений. ** Ввод результатов измерений с помощью клавиатуры.			

Параметры ветрового воздействия измеряются стандартными метеорологическими приборами, объединенными в единую измерительную систему регистрации данных.

Колебания башни при реальных ветровых воздействиях регистрируются комплектом сейсмометрической аппаратуры, включающей датчики виброперемещений (сейсмоприемники), блоки формирования характеристик и средства регистрации колебаний.

Геодезические измерения – контроль положения башни в пространстве (отклонение от вертикали продольной оси) выполнялись по методике, изложенной в [4]. Величины этих параметров – одни из основных нормируемых характеристик, по которым судят об эксплуатационной надежности сооружения. Контроль вертикальности определяет положение башни в пространстве и, следовательно, ее устойчивость. Для увеличения точности измерений, учитывая, что геодезический контроль вертикальности выполняется периодически и разными специалистами, оперирующими различными методи-

ками измерений, проведение этих работ в проекте прописано детально. Кроме того, детально описана методика оценки погрешности измерений.

Наблюдения за осадкой и деформацией фундаментов башни выполняются в соответствии с [5].

Появление и раскрытие трещин в железобетонной части сооружений фиксируются стационарно установленными приборами – щелемерами, оснащенными струнными преобразователями перемещений.

Основные средства измерений, заложенные в проекте, и измерительная система в целом по своим техническим характеристикам отвечают главному требованию – дают достоверную информацию о действующих природных воздействиях и реакции на них сооружения, а также объективную оценку технического состояния конструкций, на основании которых делается вывод об эксплуатационной надежности сооружения.

При этом предельно допустимые погрешности измерений не должны превышать следующие величины:

- измерения скорости ветра и преобразования в код – не более 1 м/с;
- измерения направления ветра и преобразования в код – не более 10 °С;
- измерения температуры и преобразования в код – не более 2 °С.
- измерения горизонтальных виброперемещений – не более 6 %.

Дислокация точек измерений приведена в таблице 2, а схема расположения их на башне – на рис. 1.

Программно-технический комплекс мониторинга. Основным базовым элементом системы мониторинга является «Программно-технический комплекс мониторинга телевизионной башни (ПТКМ ТБ)», состоящий из специальных программных средств, первичных преобразователей (датчиков) и контроллеров пункта наблюдения.

ПТКМ ТБ предназначен для решения следующих основных задач:

- получение и накопление статистических данных о метеорологических воздействиях (скорости и направлении ветра);
- определение действительных значений динамических параметров работы башни как реакции на реальные ветровые воздействия;
- накопление статистических данных о сейсмических воздействиях и геометрических характеристиках сооружения;
- накопление данных визуального осмотра башни, включающих обмеры выявленных дефектов и повреждений ее конструкции;
- просмотр архивов данных;
- формирование отчетных документов;
- формирование файлов данных для выбранных интервалов времени для передачи их в пакеты прикладных программ для дальнейшей обработки, а также в систему АСУТП через стандартный модем по коммутируемым линиям.

Конструкция комплекса обеспечивает автоматическое вычисление следующих величин в реальном масштабе времени: средней скорости ветра – 10-минутный интервал осреднения; максимальной скорости ветра за последние 10 мин наблюдений; среднего направления ветра (сектор) – 10-минутный интервал осреднения; средних за определенный период и максимально измеренных амплитуд колебаний башни; частот первых двух форм колебаний; спектральных характеристик колебательного процесса.

Таблица 2

Параметры измерений и инструментальных наблюдений	Кол-во точек измерений	Номер зоны расположения (дислокации) точек измерений							
		1	2	4	8	17	5..7	9... 17	18... 20
Горизонтальные колебания ж/б ствола башни	2				•				
Горизонтальные колебания антенной части башни	2					•			
Температура бетона и металлоконструкций	9			•	•	•			
Параметры ветра	6			•	•	•			
Раскрытие трещин и зазоров ж/б ствола башни		По всей высоте ж/б ствола башни							
Осадка фундамента	4		•						
Сейсмоколебания основания башни	1	•							
Пространственное положение башни	32		•				•	•	•

Конструкция комплекса обеспечивает ручной ввод данных геодезических измерений геометрических параметров сооружения в виде четырехразрядного десятичного кода с плавающей запятой. Объем вводимых данных – до 200 измерений за один цикл, периодичность – один раз в месяц. Кроме того, обеспечивается ручной ввод данных (объемом до 200 измерений за один цикл) визуального осмотра и контрольных обмеров дефектов и повреждений сооружения. Ввод и представление данных визуального осмотра и контрольных измерений осуществляется в виде текста таблицы с кодированием дефектов и повреждений. Периодичность проведения визуального осмотра и ввода данных – один раз в месяц.

Состав и назначение основных элементов ПТКМ ТБ. Разработанная в составе проекта структурная схема программно-технического комплекса мониторинга телевизионной башни приведена на рис. 2.

Ядром ПТКМ ТБ является *Автоматизированное рабочее место наблюдателя* (АРМН), которое реализовано на базе персонального компьютера (ПК), размещено в помещении башни на уровне 5 м и предназначено для: ведения пожизненного архива мониторинга телевизионной башни; обработки и визуализации результатов измерений на экране монитора и просмотра результатов мониторинга, размещенных в архиве.

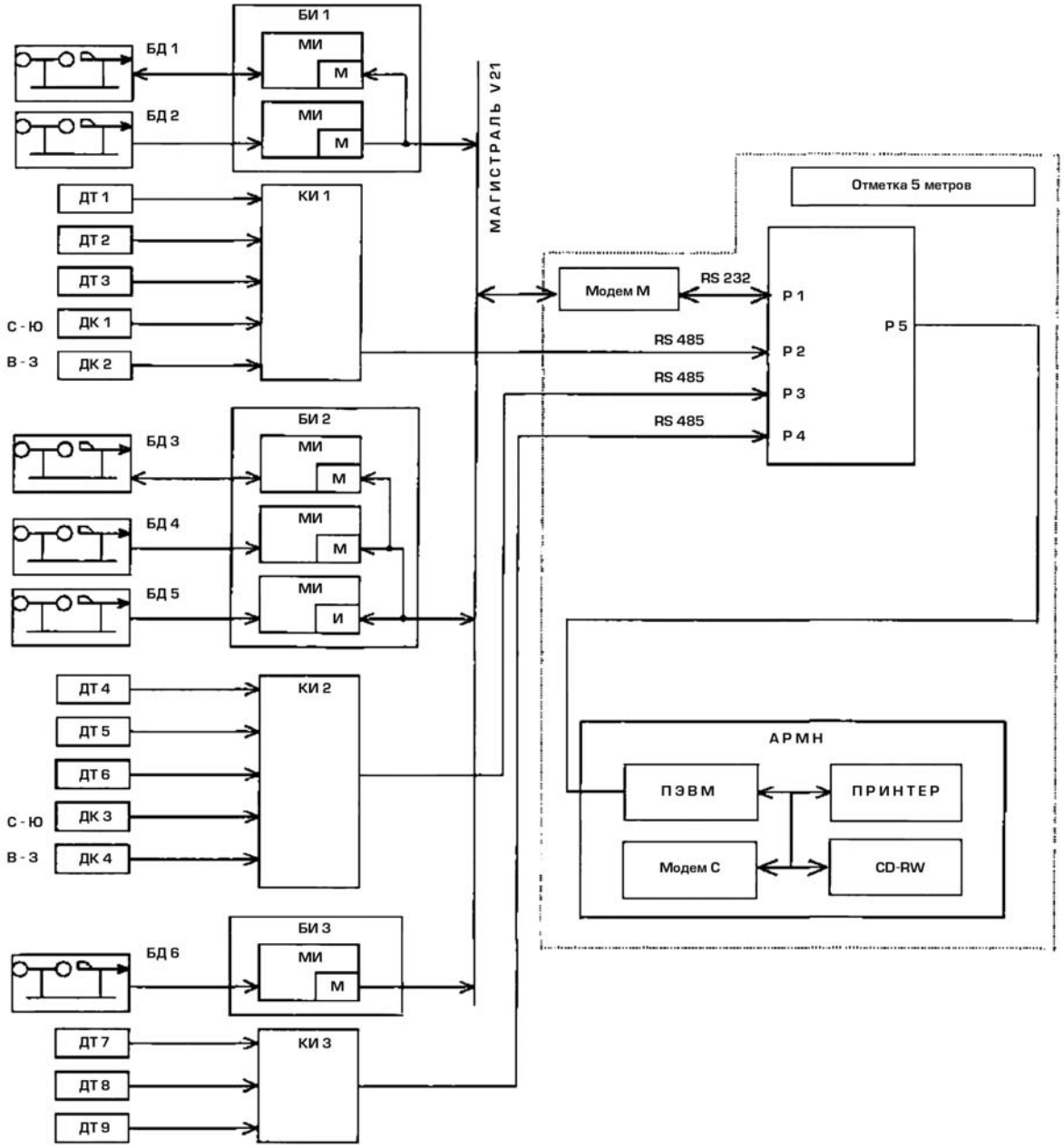


Рис. 2. Структурная схема ПТКМ ТБ

АРМН получает измерительную информацию посредством *контроллера сбора информации* (КСИ), который работает в непрерывном режиме. Кроме того, часть измерительной информации, которая обрабатывается и накапливается в АРМН, вводится через клавиатуру (см. табл. 1.).

АРМН оснащен устройством для записи информации. Файлы данных, сформированные для выбранных интервалов времени, передаются в пакеты прикладных программ для дальнейшей обработки или по коммутируемым линиям на удаленный компьютер. Для этого в состав АРМН введен стандартный модем (С).

КСИ оснащен системой, предотвращающей «зависание» программы при кратковременных отключениях питания и сбоях в работе системы, что обеспечивает его работоспособность в автономном режиме.

Для получения измерительной информации, поступающей в КСИ, предназначены блоки измерительные БИ 1, БИ 2 и БИ 3, к которым подключены шесть аэрорумбометров, а также контроллеры измерительные КИ 1, КИ 2 и КИ 3, к которым подключены 9 датчиков температуры и 4 датчика горизонтальных колебаний.

Для обеспечения передачи измерительной информации от БИ между их выходной шиной и входом КСИ включен специализированный модем, преобразующий сигналы БИ в сигналы стандартного интерфейса RS 232. На отметках 10, 160 и 240 м используются одно-, трех- и двухканальные БИ соответственно. Ко входам БИ подключено 6 блоков датчиков ветра (БД1...БД6).

Передачу измерительной информации в КСИ осуществляют по интерфейсу RS 485. На вход каждого КИ подключено три датчика температуры (ДТ1…ДТ6) конструкции. Датчики температуры установлены на внутренней поверхности металлической (антенной) части башни и на внешней поверхности ее железобетонного ствола. Кроме того, ко входам КИ 1 и КИ 2 подключено по два датчика горизонтальных колебаний, которые выдают на их вход напряжение, пропорциональное скорости перемещения по направлениям север–юг и восток–запад.

Программное обеспечение программно-технического комплекса мониторинга (ПО ПТКМ ТБ) включает две подпрограммы: контроллера сбора информации (ПП КСИ) и автоматизированного рабочего места наблюдателя (ПП АРМН). ПП КСИ реализовано в операционной системе LINUX. Она призвана реализовать основную функцию КСИ – сбор измерительной информации, поступающей от датчиков колебаний, ветра и температуры, установленных на башне, через аналого-цифровые преобразователи соответствующих контроллеров. Работа КСИ проходит в непрерывном автоматическом режиме (без участия оператора). Выходные сигналы датчиков колебаний подвергаются дискретизации с частотой 25 Гц, что обеспечивает требуемую достоверность регистрации сигналов с частотным диапазоном от 0,1 до 5 Гц. Выходные сигналы датчиков температуры регистрируются один раз в минуту, значения скорости и направления ветра – каждые три секунды. В архиве, создаваемом ПП КСИ, сохраняются все поступившие на его входы данные в течение пяти суток. ПП КСИ обеспечивает передачу содержимого архива, а также текущей измерительной информации в АРМН. Порядок передачи определяется ПП АРМН.

ПП АРМН предназначена для: отображения информации о параметрах работы РТБ в реальном масштабе времени (с задержкой 1 мин) и о работе комплекса (просмотр архива), а также для сохранения информации, полученной во время работы комплекса.

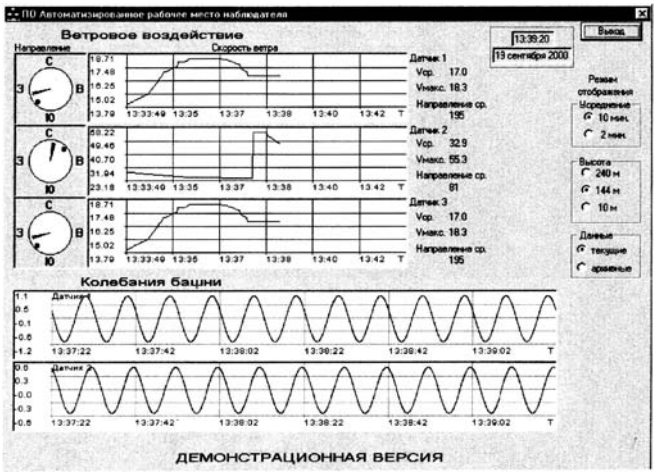
ПП АРМН обрабатывает данные, поступившие от КСИ, и каждую минуту выводит на монитор следующие наблюдаемые параметры: направление и скорость ветра, температуру, спектральную плотность колебаний объекта в диапазоне частот от 0,1 до 6 Гц, рассчитанную за предшествующие периоды для каждой из отметок. Для просмотра спектральной плотности предусмотрено три различающихся по цвету маркера. Каждый маркер можно настроить на просмотр амплитуды любой из гармоник спектральной плотности. В этой точке будет показана частота гармоники, амплитуда по осям *X* и *Y*, а также направление колебания сооружения для этой гармоники.

ПП АРМН обеспечивает для выбранной точки наблюдения отображение на экране монитора следующей информации:

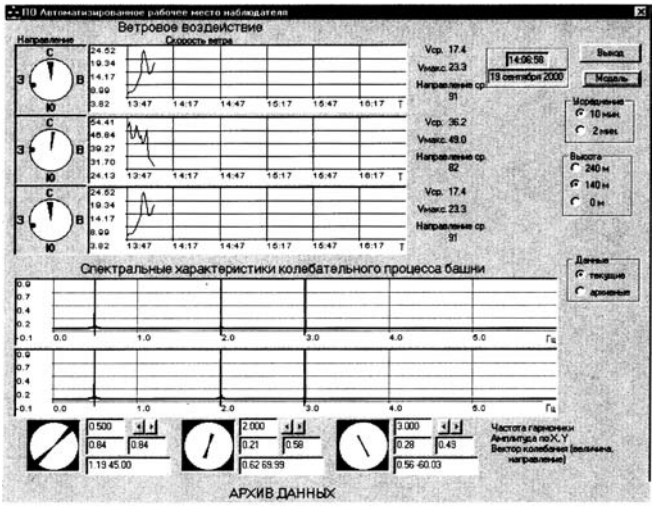
- даты и времени наблюдения;
- средней и максимальной скорости ветра за 2 (10) мин – три десятичных разряда с ценой единицы наименьшего разряда 0,1 м/с для каждого измерителя;

- графика измерения средней скорости ветра с осреднением 1 мин во времени для каждого измерителя;
- текущего среднего направления ветра за 1 мин – в виде точки на круговой диаграмме для каждого измерителя;
- текущего среднего направления ветра за 2 (10) мин – в виде сектора на круговой диаграмме для каждого измерителя;
- среднего направления ветра за 2 (10) мин – три десятичных разряда с ценой единицы наименьшего разряда 1° для каждого измерителя;
- максимального отклонения направления ветра за 2 (10) мин в виде дуги круговой диаграммы для каждого измерителя;
- текущей температуры – три десятичных разряда с ценой единицы наименьшего разряда 0,1 °С для каждого измерителя;
- горизонтальных колебаний в виде графиков спектров горизонтальных колебаний за последние 10 мин в двух взаимно перпендикулярных направлениях;
- отображения амплитуды и направления колебания на выбранной частоте в виде графика в прямоугольной системе географических координат;
- данных геодезических измерений – в табличной форме за текущий и предыдущий периоды проведения измерений;
- данных визуального осмотра и контрольных измерений – в виде журнала периодических измерений.

ПП АРМН обеспечивает создание, хранение и отображение в течение всего срока службы сооружения указанных выше параметров, а также работу с архивом. Для просмотра архивных данных достаточно нажать кнопку «календарь» и выбрать день, месяц и год, за которые необходимо просмотреть данные.



а



б

Рис. 3. Фрагменты отображения на экране монитора ПЭВМ текущих (а) и архивных (б) величин контролируемых параметров

Фрагменты отображения на экране монитора текущих контролируемых параметров башни и архивных данных изображены на рис. 3.

[1] *Шульман З.А.* Испытания и мониторинг инженерных сооружений /З.А. Шульман, И.З. Шульман – Днепропетровск: Из-во «Лира», 2013. – 532 с.

[2] Экспериментальное исследование динамических характеристик ТВ-башни в г. Ташкенте и г. Риге / [*Шульман З.А., Малов В.Ю. и др.*] // Повышение долговечности антенных сооружений / Всесоюзное научно-техническое совещание: тез. докл. – Москва, 1988. – С. 28–80.

[3] Экспериментальные исследования телевизионной башни высотой 375 м в г. Ташкенте (методы и средства) / [*Шульман З.А., Нейман Е.А. и др.*] // Экспериментальные исследования и испытания строительных конструкций / Всесоюзное научно-техническое совещание: тез. докл. – Симферополь, 1978.

[4] Инструкция по эксплуатации металлических антенных опор радиоцентров и радиотелевизионных передающих станций, утверждена Минсвязи СССР 23.04.1980 г. Издание: тез. докл. – Львов, 1987. – С. 75–76.

[5] Руководство по наблюдениям за деформациями оснований и фундаментов зданий и сооружений, разработанных Научно-исследовательским институтом оснований и подземных сооружений им. Н. М. Герсеванова Госстроя СССР (г. Москва, 1975 г.).

Надійшла 10.11.2015 р.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ МЕМБРАННЫХ ПОКРЫТИЙ

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.

Цели, 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 проектирования, 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

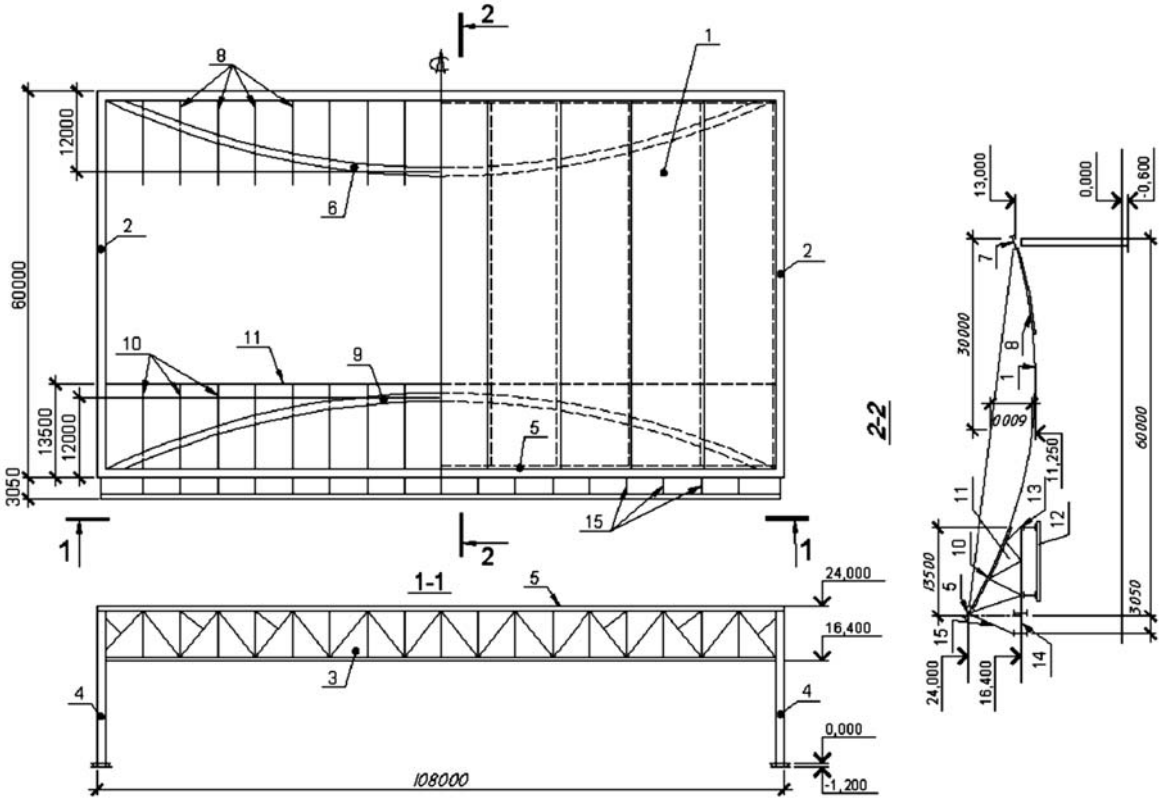


Рис. 2. Конструктивная схема ангара:

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 загружения 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 подобия, т.е. соотношение между частотами колебаний модели $f_м$ и натурной конструкции $f_н$, составляет:

$$f_н = 0{,}2\, f_м .$$

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.

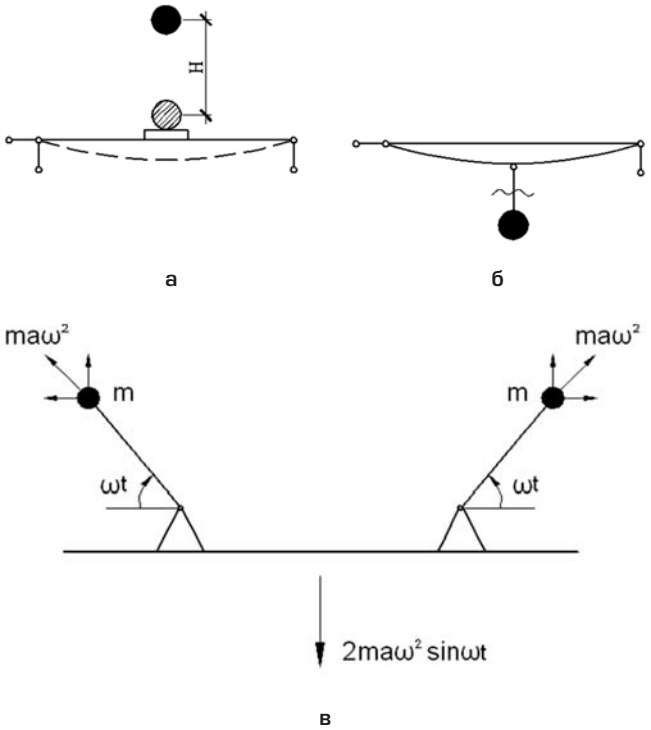


Рис. 3. Варианты схем возбуждения динамических нагрузок покрытия модели ангара:

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.

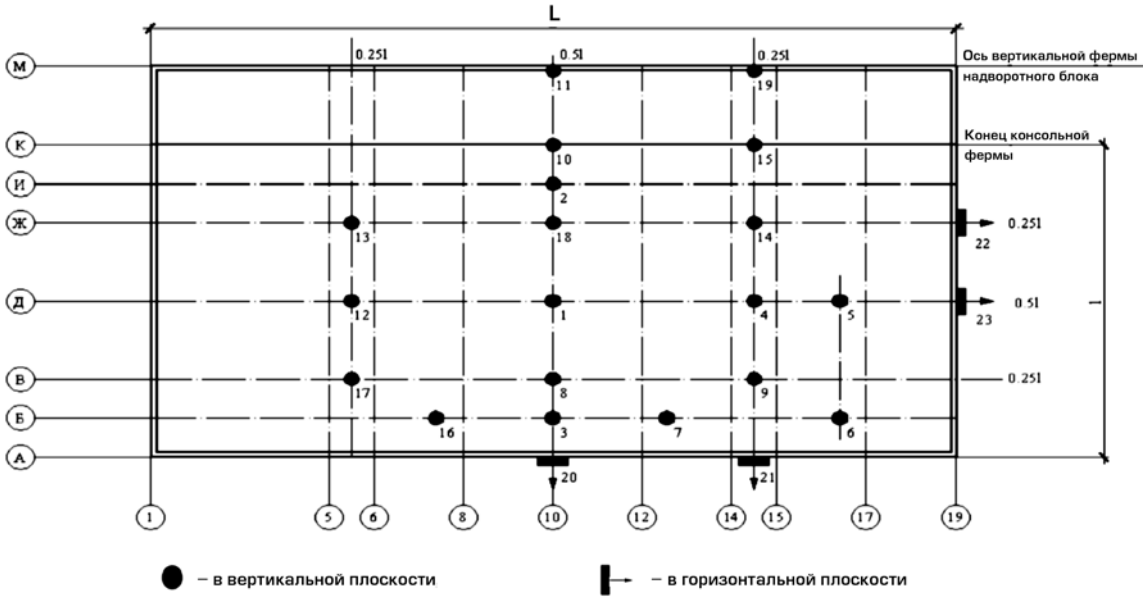


Рис. 4. Схема расположения точек возбуждения и регистрации колебаний

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 SPEKTR1. 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.

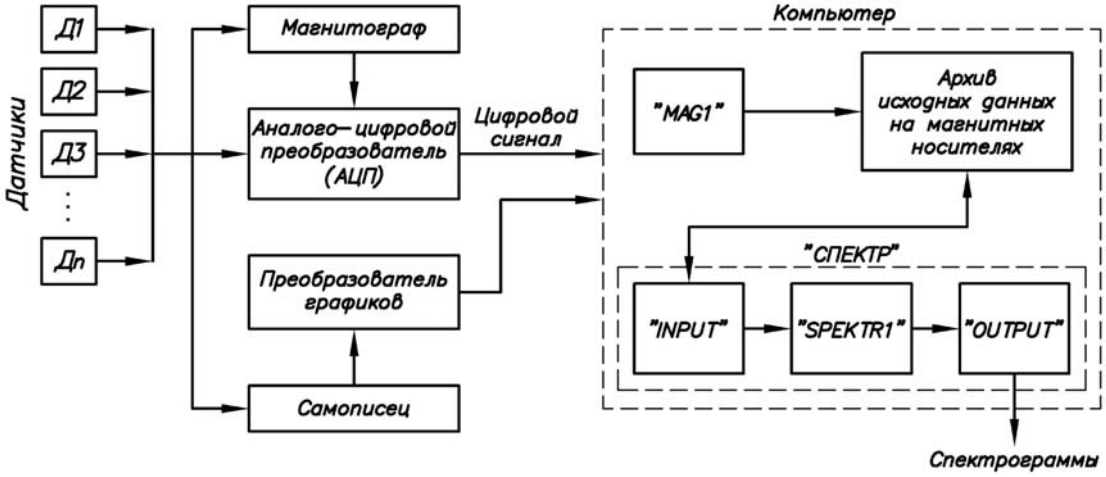


Рис. 5. Структура программного комплекса для сбора и обработки экспериментальных данных

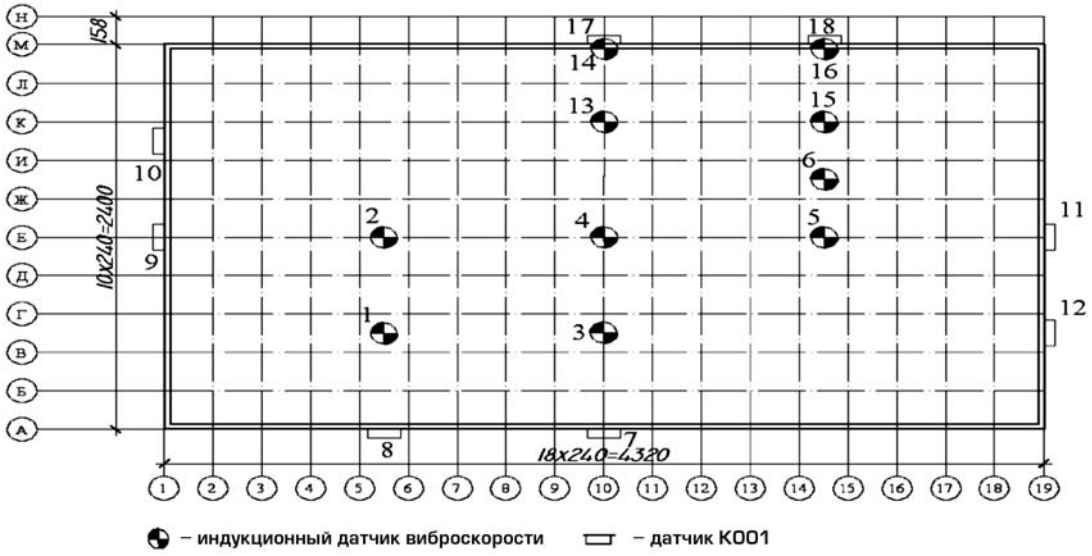


Рис. 6. Расположение датчиков при определении параметров горизонтальных колебаний модели мембранного покрытия

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 покрытия при импульсном возбуждении представлен на рис. 8.

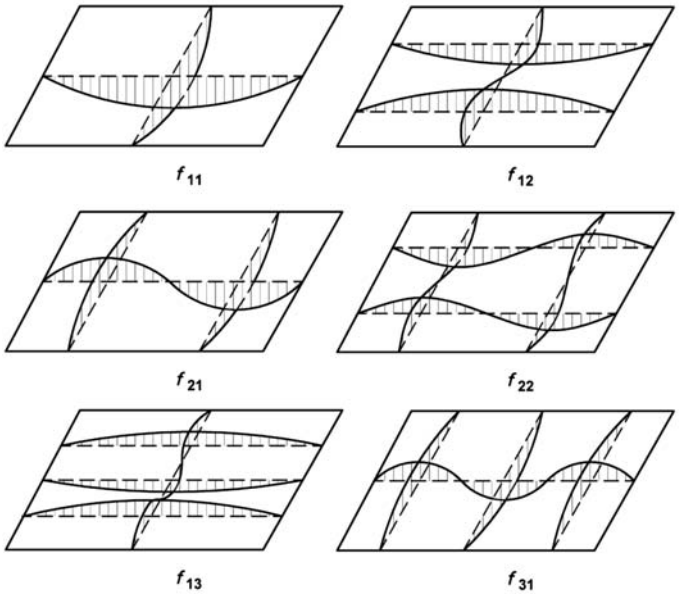


Рис. 7. Предварительная оценка шести низших собственных форм колебаний модели мембранного покрытия

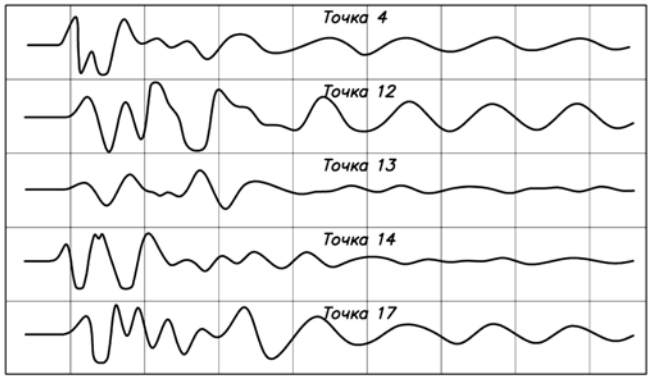


Рис. 8. Фрагмент записи колебаний модели мембранного покрытия. Импульсное возбуждение в т. 1

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 приведеной на рис. 7.

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).

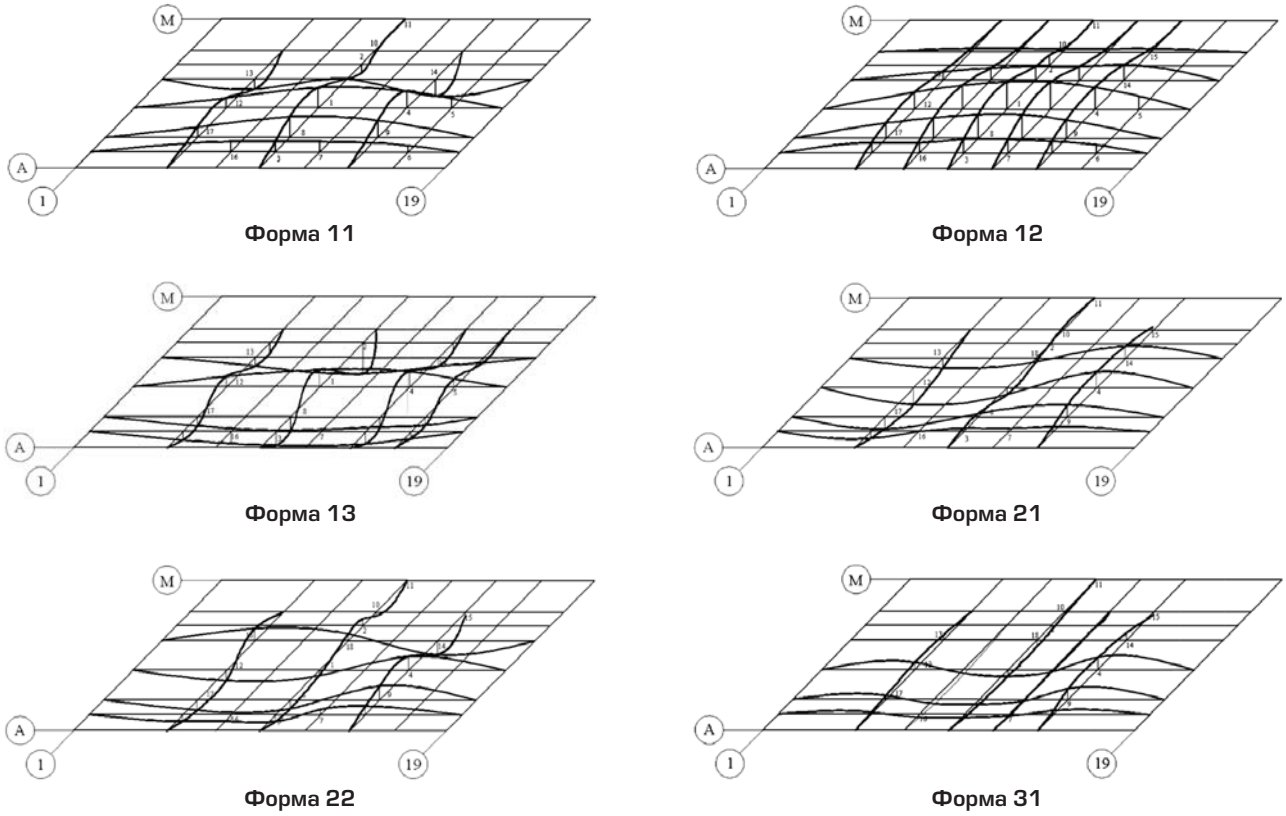


Рис. 9. Формы собственных колебаний мембранного покрытия базового варианта модели

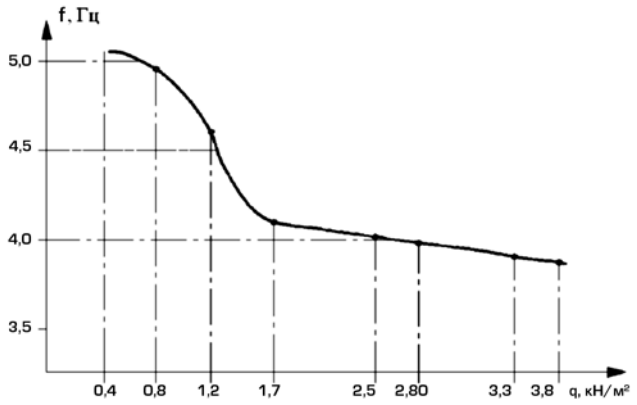


Рис. 10. Зависимость частоты низшей формы колебаний мембраны от величины нагрузки на покрытие модели

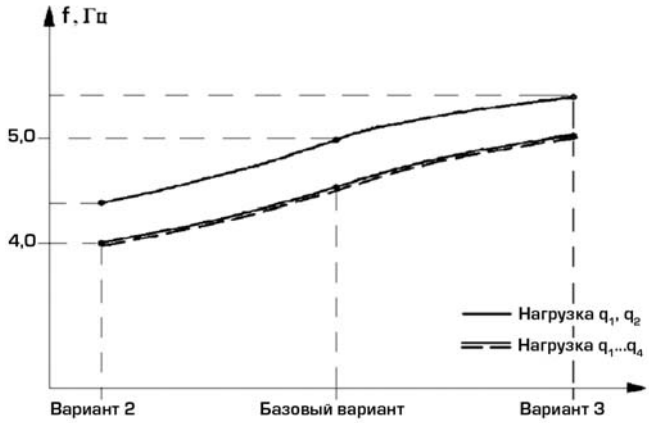


Рис. 11. Зависимость частоты низшей формы колебаний покрытия от жесткостей опорного контура моделей

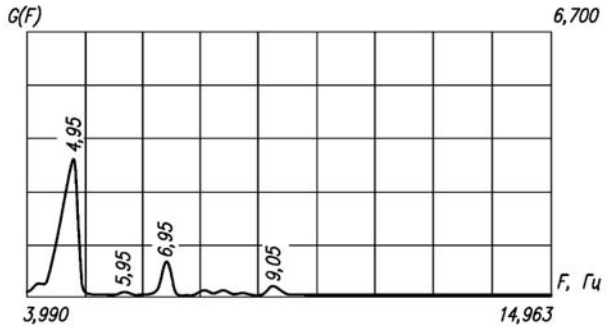


Рис. 12. Спектрограмма колебаний модели мембранного покрытия.
Возбуждение импульсное в т. 21.
Регистрация колебаний в т. 20

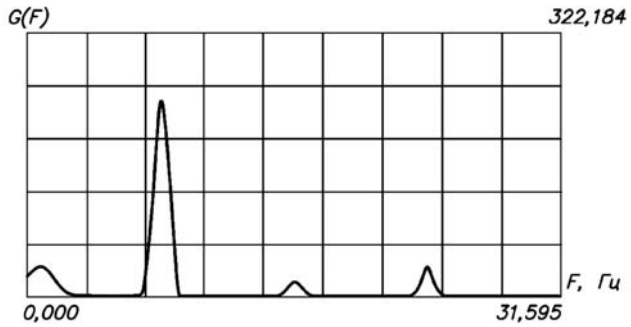


Рис. 13. Спектрограмма колебаний модели мембранного покрытия.
Возбуждение импульсное в т. 5.
Регистрация колебаний в т. 8

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 частотах 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 δ = 0,036…0,08 (среднее значение по различным экспериментам – δ = 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.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА БОЛЬШЕПРОЛЕТНОГО ВИСЯЧЕГО МОСТА

З.А. Шульман
технический директор
корпорации «Промстальконструкция»,
к.т.н., г. Днепропетровск

Ведомственная система контроля технического состояния висячего моста пролетом 720 м через р. Днепр на трассе аммиакопровода Тольяти–Одесса (рис. 1), заключающаяся в традиционных методах содержания мостовых конструкций, предусматривает его периодический визуальный осмотр службой эксплуатации и детальные, один раз в 3–5 лет, обследования конструкций специализированной организацией [1].

Такая система не обеспечивает получение непрерывной и объективной информации о параметрах работы и состоянии сооружения в целом. Фактически она фиксирует либо появление того или иного видимого дефекта конструкции, который может привести к непредвиденным последствиям, либо наступление нестандартной ситуации как свершившегося факта. Если в первые годы эксплуатации такая система удовлетворяет требованиям технической диагностики мостового сооружения, то в последующем, учитывая сложности конструктивной формы, фактическое состояние конструкций и остаточный ресурс, необходимо использование современных методов диагностики и оценки эксплуатационной надежности конструкций.

Решение проблемы – в создании «***Автоматизированной системы инструментального мониторинга технического состояния висячего моста***», которая основывается на непрерывном в реальном масштабе времени долговременном измерении наиболее представительных параметров работы моста и прогнозировании на их основе технического состояния сооружения. Такими параметрами являются природные воздействия и реакция на них сооружения, а также положение сооружения в пространстве и величина судоходного габарита. Специальное расчетно-теоретическое обоснование системы мониторинга с оценкой предельных значений параметров воздействий и работы моста, а также показателей его надежности в сочетании со специально созданным программным обеспечением и результатами регламентных осмотров обеспечивает получение достоверной информации, необходимой для прогнозирования и диагностики безопасной эксплуатации перехода, принятия неотложных и своевременных мер по предотвращению аварийных ситуаций.

В основе построения системы мониторинга концепция единого информационного обеспечения данными о параметрах работы висячего моста при реальных ветровых воздействиях, являющихся основной нагрузкой на сооружение (инструментальный мониторинг), и результатах осмотров и контрольных измерений, выполняемых службой эксплуатации в составе работ по содержанию моста (технический надзор).

Рис. 1. Висячий мост через р. Днепр на трассе аммиакопровода Тольятти–Одесса

 © Шульман З.А.

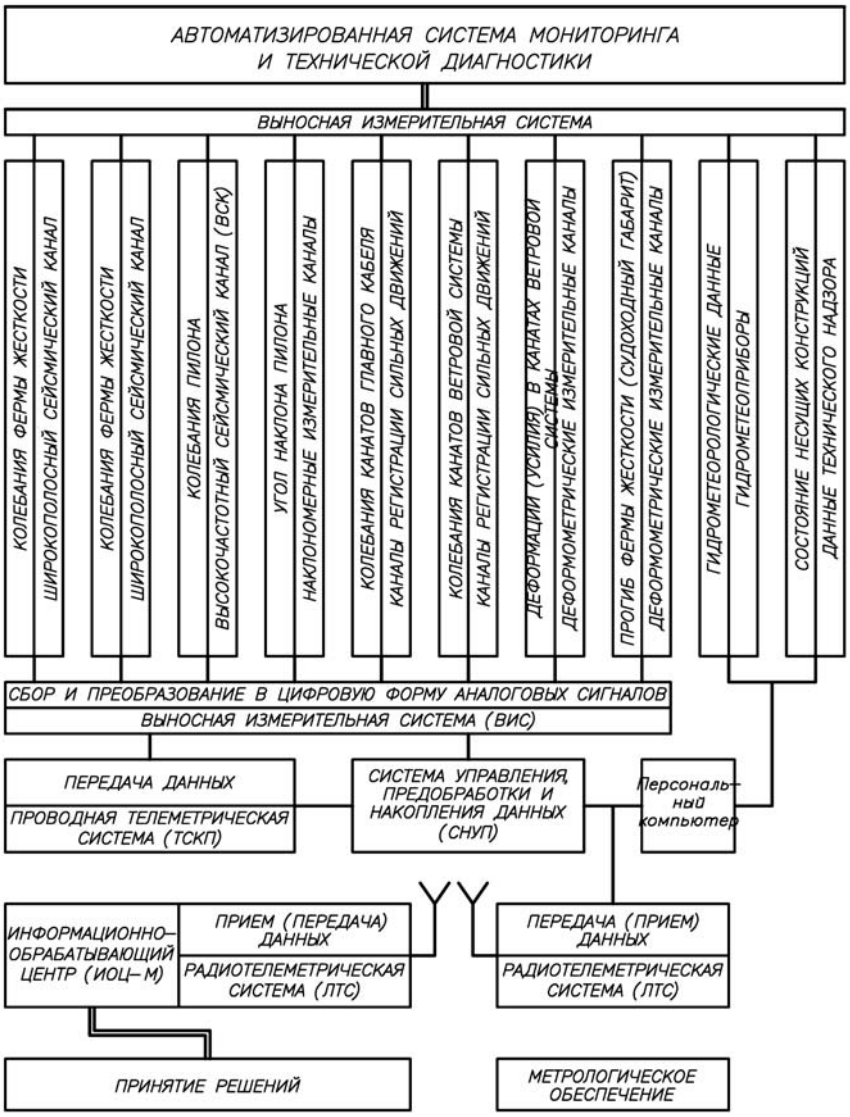


Рис. 2. Функциональная схема автоматизированной системы мониторинга и технической диагностики висячего моста в процессе эксплуатации

Функциональная схема комплексной автоматизированной системы мониторинга и технической диагностики висячего моста через р. Днепр в процессе эксплуатации приведена на рис. 2.

Автоматизированная система мониторинга технического состояния моста разрабатывается в составе проекта содержания и эксплуатации мостового перехода на основе действующих нормативных и рекомендательных документов по научному сопровождению строительства и эксплуатации уникальных зданий и сооружений [2–5] и включается в качестве подсистемы «Техническое состояние перехода аммиакопровода через реку Днепр» в АСУТП аммиакопровода.

В соответствии с [6], ГОСТ 20913-75 «АСУТП. Стадии создания» с учетом специальных требований по обеспечению надежности функционирования система мониторинга разработана в следующих частях: общесистемные решения (утверждаемые в объеме технического задания); информационное и программное обеспечение.

Кроме того, в составе проекта разработаны:

- основные технические решения по оснащению моста техническими средствами информационного обеспечения мониторинга (установка, монтаж, прокладка кабельных линий, оборудование рабочего места оператора-наблюдателя);
- предложения по организационному обеспечению функционирования системы мониторинга.

Общесистемные проектные решения и информационное обеспечение системы мониторинга построены на следующих основных принципах:

1. Основным элементом системы инструментального мониторинга является программно-технический комплекс моста (ПТКМ), который функционирует по принципу «измерение–сбор–обработка–анализ–предоставление информации» о метеорологических воздействиях и параметрах работы моста, вызванных этими воздействиями, сравнение полученных данных с расчетными пороговыми значениями, при превышении которых возможно наступление экстремальной ситуации.

2. Система работает в автоматическом режиме сбора и накопления информации, поступающей от приборов с электрическими преобразователями (датчиков). Опрос системы осуществляется в реальном масштабе времени при заданных величинах скорости ветра или колебаниях фермы жесткости, а также по запросу наблюдателя.

Результаты измерений, выполняемых механическими приборами (усилия в канатах) и геодезическими инструментами (геометрические параметры элементов моста), заносятся в базу данных с помощью клавиатуры.

3. В случае превышения контролируемых параметров пороговых величин (скорости ветра, амплитуд колебаний или судоходного габарита) система формирует сигнал предупреждения службе эксплуатации о необходимости принятия срочных мер для уменьшения последствий возможного возникновения экстремальной ситуации, а именно:

- прекращение подачи аммиака в трубопровод в пределах мостового перехода;
- эвакуация персонала;
- оповещение населения близлежащих населенных пунктов;
- предупреждение судоводителей и др.

4. Информационное обеспечение мониторинга функционирует на базе измерений представительных информативных параметров, сгруппированных в следующие подсистемы:

- *Подсистема инструментального мониторинга*, включающая измерения: скорости и направления ветра; вертикальных, горизонтальных поперечных, а также крутильных колебаний фермы жесткости; судоходного габарита (величины строительного подъема фермы жесткости).
- *Подсистема данных контрольных измерений* при проведении технического надзора, включающая измерения: продольного профиля фермы жесткости; отклонения от вертикали пилонов; усилий в канатах вантовой системы.
- *Подсистема приборного контроля технического состояния трубопровода* в пределах мостового перехода (разрабатывается по отдельному проекту).
- *Подсистема результатов осмотров и анализа технического состояния конструкций моста.*

Указанные подсистемы объединены в единый информационно-измерительный комплекс системы мониторинга.

5. ПТКМ предусматривает следующие режимы сбора информации: автоматический – для подсистемы инструментального мониторинга и ручной ввод с клавиатуры – для подсистемы данных измерений, выполняемых периодически в процессе технического надзора, а также результатов осмотров конструкций.

6. Обработка и анализ данных измерений всех подсистем осуществляется персональным компьютером и предоставляется по запросу.

7. Показатели назначения. ПТКМ обеспечивает вычисление по данным измерений следующих величин:

- средней скорости ветра с 10-минутным осреднением;
- максимальной скорости ветра за последние 10 мин наблюдений;
- среднего направления ветра за 10-минутный интервал осреднения;
- среднеквадратичного отклонения (стандарт) амплитуд горизонтальных, вертикальных и крутильных колебаний фермы жесткости;
- частоты и периода вертикальных и горизонтальных колебаний;
- параметров крутильных колебаний;
- величины судоходного габарита;
- продольного профиля и величины строительного подъема фермы жесткости;
- отклонений оси пилонов от вертикали;
- усилия в канатах вантовой системы;
- деформаций (осадок) фундаментов и устоев;
- температуры воздуха в непосредственной близости от конструкций моста (фермы жесткости);
- данных сопоставления измеренных и предельных значений контролируемых величин.

ПТКМ обеспечивает ввод данных визуального осмотра конструкций в виде текста таблицы кодированных дефектов и повреждений, а также результатов контрольных измерений.

Конструкция программно-технического комплекса дает возможность отображения на экране монитора автоматизированного рабочего места (АРМН) следующей информации:

- даты и времени наблюдения;
- мгновенной скорости ветра – три десятичных разряда с ценой единицы наименьшего разряда 0,2 м/с;
- средней скорости ветра – в виде графика изменения средней скорости ветра;
- максимальной скорости ветра – в виде графика изменения максимальной скорости ветра во времени;
- среднего направления ветра – в виде сектора на круговой диаграмме;
- горизонтальных колебаний – в виде графика амплитуды (размаха) горизонтальных колебаний фермы жесткости;
- вертикальных колебаний – в виде графика вертикальных колебаний в середине и четверти пролета фермы жесткости;

- данных измерений судоходного габарита – в табличной форме;
- данных геодезических измерений геометрических характеристик моста;
- данных измерений усилий в канатах главного кабеля поясов ветровой фермы и раскосной системы – в табличной форме за текущий и предыдущие периоды проведения измерений;
- температуры воздуха в середине пролета моста – в табличной форме;
- данных визуального осмотра и контрольных измерений – в виде журнала текущих, периодических осмотров и наблюдений установленной формы.

Форма конструкции программно-технического комплекса обеспечивает отображение на экране монитора текущей информации о результатах сопоставления измеренных и предельных величин контролируемых параметров – в табличной форме с изменением во времени данных указанного сопоставления. Предельные величины контролируемых параметров определяются расчетом.

Конструкция комплекса обеспечивает создание и хранение архива данных (измененных и введенных вручную) в течение всего срока службы сооружения. Она же дает возможность просмотра следующих архивных данных:

- средней и максимальной скорости ветра в виде графика статистических распределений флуктуации скорости ветра;
- амплитуд горизонтальных, вертикальных и крутильных колебаний в виде графика спектральной плотности колебательного процесса;
- результатов геодезических измерений – в табличной форме;
- результатов измерений усилий в канатах вантовой системы;
- температуры воздуха – в виде графика почасовых измерений;
- результатов периодических осмотров и контрольных измерений – в табличной форме и форме журнала наблюдений.

8. Форма представления данных на экране монитора, их содержание и объем одновременно выводимых на экран данных уточняется в процессе разработки специальных программных средств (ПС АРМН).

9. Предельные значения контролируемых величин и измеряемых параметров работы сооружения определяются (рассчитываются), как правило, авторами проекта моста.

10. Техническое оснащение висячего моста должно обеспечить ПТКМ необходимой периодической и непрерывной в реальном масштабе времени информацией о параметрах работы конструкции. Проектом предусмотрены следующие основные технические средства измерений: измеритель скорости и направления ветра; датчики: горизонтальных и вертикальных колебаний элементов моста, температуры воздуха и конструкций моста, уровня поверхности воды в реке относительно фермы жесткости, акустоэмиссионной аппаратуры контроля трубопровода; измерители усилий в канатах вантовой системы; геодезические инструменты.

Схема дислокации точек измерений представлена на рис. 3, типы первичных преобразователей и датчиков для оснащения моста системой инструментального мониторинга и их технические характеристики приведены в таблице.

Структурная схема ПТКМ приведена на рис. 4.

11. Конструктивные требования к комплексу и составным частям. Передача информации от первичных преобразователей (датчиков) к аппаратуре ПСИ осуществляется по физическим (кабельным) линиям, а от ПСИ к АРМН – либо по выделенному каналу телефонной связи, либо по служебному каналу радиосвязи.

Конструктивное исполнение средств измерений, размещаемых на мосту, должно обеспечивать их защиту от проникновения твердых тел (механическая защита), пыли и влаги, прямого воздействия атмосферных осадков и солнечной радиации.

12. Основные требования к техническим средствам комплекса в части погрешностей измерений:

- предел допускаемой основной погрешности измерения скорости ветра – не более 1 м/с;
- предел допускаемой погрешности измерения направления ветра – не более ±10°;
- предел допускаемой основной погрешности измерения температуры воздуха – не более 1 °С;
- полоса частот при измерении перемещений – от 0,03 до 4 Гц;

- предел допускаемой основной погрешности измерений колебаний – не более 10 %;
- среднеквадратическая погрешность измерений геометрических характеристик моста геодезическими инструментами по стандартным методикам: нивелиром – до 0,5 мм на 1 км двойного хода, теодолитом – до 2 с при измерениях вертикальных и горизонтальных углов;
- относительная погрешность нестандартизированных средств контроля усилий в канатах вантовой системы – не более 5 %.

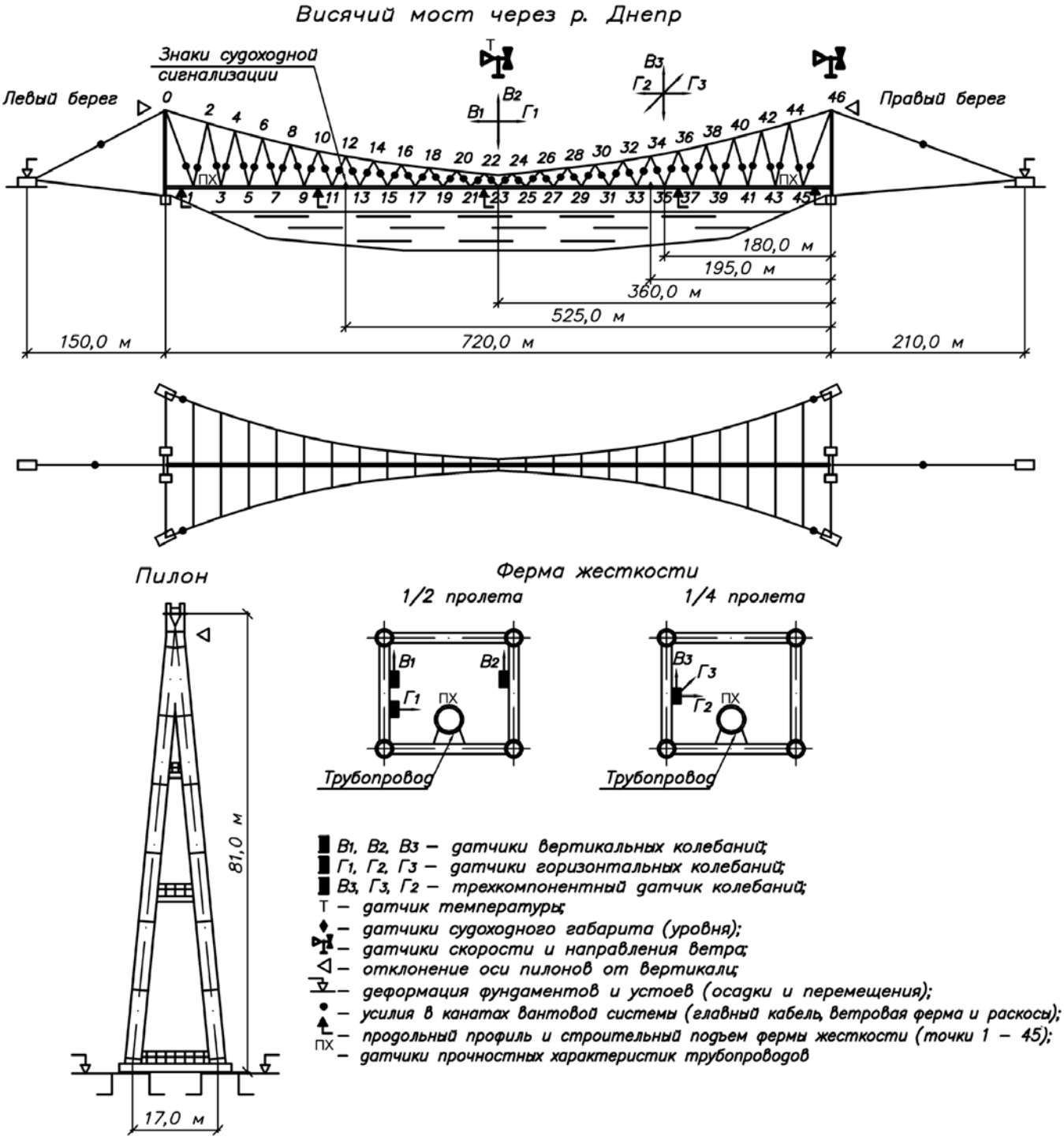


Рис. 3. Схема дислокации точек измерений

Виды и технические характеристики средств измерений

№	Наименование измеряемого параметра		Пределы измерений	Кол-во каналов
1	Поперечные горизонтальные колебания фермы жесткости в середине пролета	Частота	от 0,1 до 6 Гц	2
		Амплитуда	от 1 до 200 мм	
2	Вертикальные и крутильные колебания фермы жесткости в середине пролета	Частота	от 0,1 до 6 Гц	3
		Амплитуда	от 10 до 100 мм	2
3	Вертикальные и горизонтальные (поперечные и продольные) колебания фермы жесткости в четверти пролета	Частота	от 0,1 до 6 Гц	3
		Амплитуда	от 10 до 100 мм	
4	Температура фермы жесткости в середине пролета		от –40 до +70 °С	1
5	Параметры ветра	Скорость	от 1,2 до 60 м/с	2
		Направление	от 1 до 360 градусов	
6	Судоходный габарит (расстояние от зеркала воды до фермы жесткости)		от 5 до 25 м	2
7	Отклонение оси пилонов от вертикали вдоль моста		от 0 до 10 угл. мин	1
8	Продольный профиль и строительный подъем фермы жесткости		1400 ± 200 мм	1
9	Усилия в канатах вантовой системы		50 – 1200 кН	2
10	Прочностные характеристики трубопровода (комплект акустоэмиссионного)		–	1 (6 датч.)

Примечания:
1. Пределы измерений по пп. 1–3 приняты по результатам испытаний моста.
2. Ввод результатов измерений параметров, указанных в пп. 1–6, осуществляется автоматически.
3. Ввод результатов измерений параметров, указанных в пп. 7–10, осуществляется оператором с помощью клавиатуры.
4. Типы первичных преобразователей и датчиков, их марки уточняются в процессе разработки рабочего проекта.

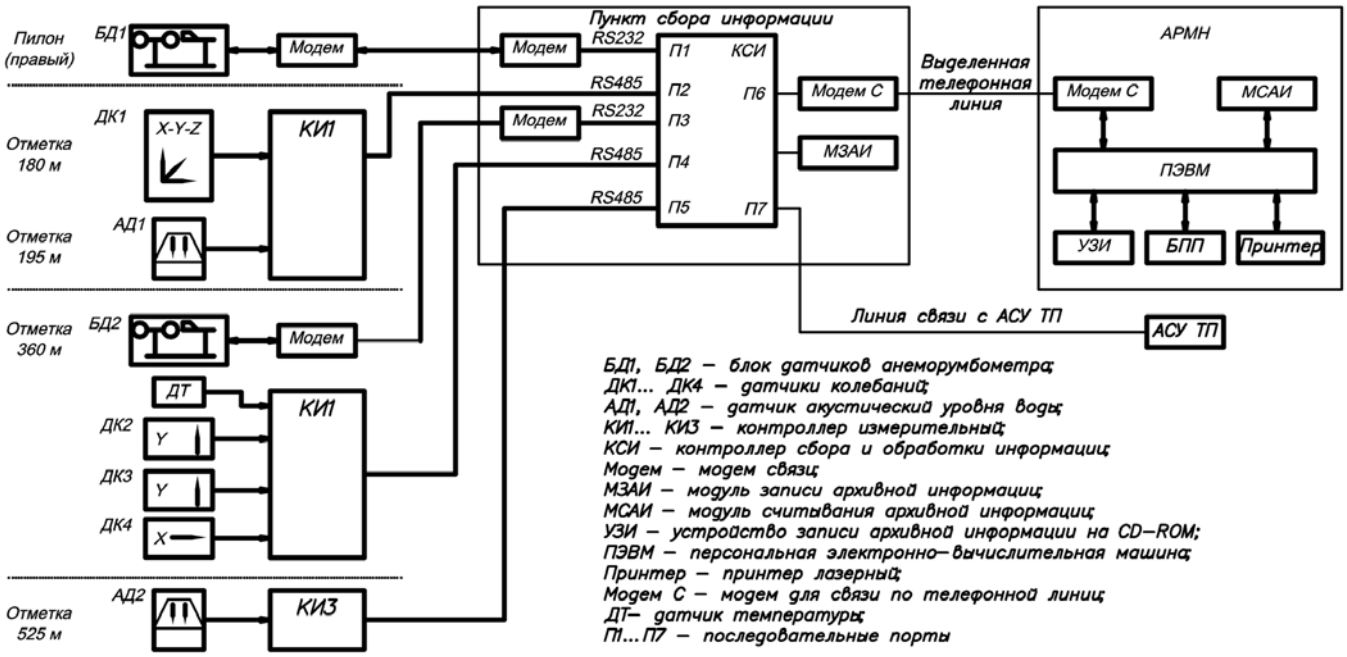


Рис. 4. Структурная схема программно-технического комплекса мониторинга (ПТКМ)

13. В соответствии с нормативными документами на создание АСУТП техническая документация должна содержать:

- краткое описание программно-технического комплекса и его составных частей, в т.ч.: состав комплекса, условия эксплуатации, требования по установке и монтажу;
- комплект схем и чертежей, в т.ч.: структурную и функциональную схемы комплекса, схему электрических соединений его составных частей и комплекса в целом, чертежи и монтажные схемы установки датчиков;
- краткое руководство оператора на автоматизированное рабочее место наблюдателя (АРМН);

- заказную спецификацию и сметный расчет на поставку и монтаж оборудования, пусконаладочные работы и ввод в действие комплекса;
- специальное программное обеспечение ПЭВМ для автоматизированного сбора, обработки, анализа, предоставления и хранения информации (ПО АРМН);
- программно-логический имитатор КСИ (для отладки и сдачи в эксплуатацию ПО АРМН).

14. Система работает по следующей принципиальной схеме – информация от датчиков поступает на контроллер сбора информации, к которому подключаются все датчики. Контроллер состоит из компьютерного модуля, оснащенного программой сбора, преобразования и кратковременного хранения информации.

ПО АРМН получает от контроллера сбора информации КСИ накопленную информацию о состоянии моста с момента последнего включения до текущего времени и переходит в режим получения и отображения данных в реальном масштабе времени.

КСИ служит для сбора информации с датчиков ветра и датчиков колебаний пролетного строения и пилона. Он работает постоянно и хранит данные, полученные от всех датчиков в течение 5 суток.

ПО АРМН служит для обработки, анализа и хранения информации за весь период жизни сооружения и отображения информации в виде, необходимом специалисту. ПО АРМН имеет два окна отображения на экране монитора: текущих измерений (рис. 5) и архивных данных.

Выбор страницы отображения осуществляется нажатием кнопки *11*. Дата и время проведения измерений (текущее системное время) отображаются в полях *7* и *6*. Верхняя половина окна разделена на две части, в которых расположены два графика и две круговые диаграммы (для каждого измерителя), на которых отображаются: среднее направление ветра *1*, *3* (за 1 мин) и график изменения средней (синяя линия) и максимальной (зеленая линия) скорости ветра *2*. С правой стороны каждого графика расположены три поля, в которые выводится информация о значениях: средней скорости ветра за 1 мин *5*, максимальной – за 1 мин *4* и среднего направления ветра за 1 мин *3*. На графиках *15* отображается размах колебаний моста для каждого из шести датчиков. На каждом графике подписан соответствующий ему номер датчика. В поле *10* выводится судоходный габарит, а в поле *8* – текущая температура. В поле *13* выводятся значения максимального размаха для каждого дат-

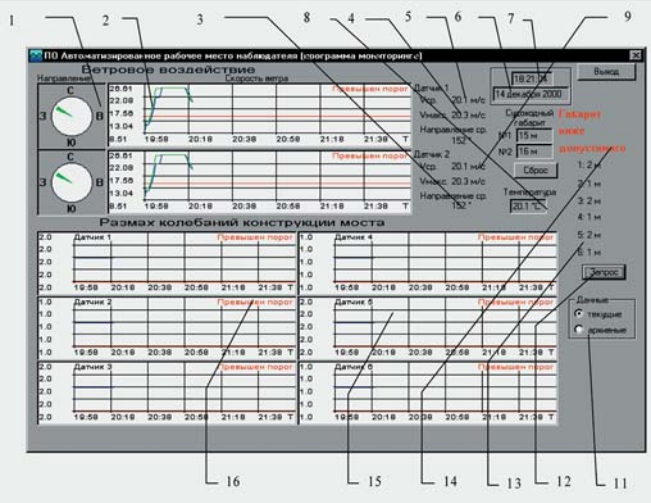


Рис. 5. Отображение окна текущих измерений ПО АРМН

чика: номер датчика указан перед двоеточием. Оператор может послать запрос о текущих параметрах мониторинга при помощи кнопки *12*. Независимо от типа страницы отображения, при получении ПП данных, превышающих красную линию, для датчика, который превысил порог, выводится красным цветом надпись «Превышен порог» *16*. При достижении судовым габаритом значения меньше заданного начинает мигать надпись «Габарит меньше допустимого» *14*. Надписи будут оставаться видимыми до нажатия оператором кнопки «Сброс» *9*.

Дальнейшее развитие системы мониторинга заключается в полной автоматизации измерений практически всех параметров работы моста, характеризующих его эксплуатационную надежность, путем дополнительных проектных разработок систем автоматизации следующих видов измерений: усилий в канатах главного кабеля, ветровой системы и раскосах; профиля и строительного подъема фермы жесткости (габарита моста); положения пилонов относительно вертикальной оси; деформации и подвижки фундаментов и анкерных устоев и др.

[1] *Шульман З.А.* Испытания и мониторинг инженерных сооружений /З.А. Шульман, И.З. Шульман – Днепропетровск: Из-во «Лира», 2013. – 532 с.

[2] ГОСТ 20913-75 «АСУТП. Стадии создания»

[3] ДСТУ Б В.2.6-25-2003 «Конструкції будинків і споруд. Автоматизовані системи технічного діагностування будівельних конструкцій. Загальні технічні вимоги».

[4] ДБН В.1.2-5:2007 «Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Науково-технічний супровід будівельних об'єктів».

[5] ОДМ 218.4.002-2008 «Руководство по проведению мониторинга состояния эксплуатируемых мостовых сооружений».

[6] ТР 182-08 «Технические рекомендации по научно-техническому сопровождению и мониторингу строительства большепролетных, высотных и других уникальных зданий и сооружений».

Надійшла 05.11.2015 р.

К ПОСТРОЕНИЮ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОЖУХОВ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ И ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

Е.С. Иосилевич
заместитель Генерального директора по техническим вопросам корпорации «Промстальконструкция», г. Днепропетровск, к.т.н.

Современное промышленное развитие невозможно без надежной высокоразвитой металлургической базы, основу которой в Украине составляет доменное производство. Решение одной из главных задач черной металлургии – выпуск необходимого объема чугуна, связано с надежностью и стабильностью работы объектов комплекса доменной печи.

Доменные печи (ДП) и воздухонагреватели (ВН), являясь технологическими агрегатами, рассматриваются в то же время как строительные конструкции во всем многообразии специфических условий их эксплуатации и возведения.

Основной функцией кожухов ДП и ВН является обеспечение герметичности их внутреннего пространства и силовое воздействие на футеровку, предотвращающее ее разрушение от внутреннего давления. Кроме того, кожухи служат для крепления разнообразного технологического оборудования, необходимого для нормального ведения технологического процесса.

Кожухи технологических агрегатов доменного комплекса по существу – это комплексные многофункциональные конструкции, представляющие собой многослойные оболочки с неоднородными слоями: стальной кожух, огнеупорная футеровка, холодильники, компенсационные слои – для ДП и стальной кожух, компенсационный слой, огнеупорная футеровка – для ВН.

Все эти составные части при работе агрегатов находятся в постоянном взаимодействии, характер которого далеко неоднозначен. Напряженно-деформированное состояние (НДС) кожухов определяется комплексной совместной работой и взаимодействием всех составных частей его многослойной конструкции с учетом передаваемых на него нагрузок и воздействий.

Одним из главных направлений повышения надежности и промышленной безопасности металлоконструкций является обоснование действующих на них нагрузок и воздействий. Заложенные в ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи» данные, как правило, статистически достоверны. Вместе с тем, имеются сооружения, для которых, в силу специфики их работы, нагрузки еще недостаточно изучены, в т.ч. и в статистическом аспекте, и носят случайных характер. К таким сооружениям относятся доменные печи и воздухонагреватели.

Основной характерной особенностью процесса доменной плавки является непрерывность, что должно было бы обуславливать стационарный характер нагрузок и воздействий, воспринимаемых конструкциями кожухов технологических агрегатов в процессе эксплуатации. Однако, реальный доменный процесс, несмотря на его действительную непрерывность, носит весьма нестабильный характер, что приводит к нестационарному характеру основных нагрузок как по величине, так и по зоне их максимального воздействия.

Нестационарность технологического процесса в первую очередь связана с его основным противоречием, заключающимся в непрерывности доменной плавки, с одной стороны, и периодичности загрузки печи и выпуска жидких продуктов плавки – с другой.

Среди других причин, нарушающих стационарный характер нагрузок, можно отметить:

- остановки печи на ремонт;
- выплавку различных видов чугуна, что приводит к существенному изменению как теплового, так и газодинамического состояния печи;
- технологические отклонения, вызывающие неполадки в работе печи (канальный, периферийный ход газов, ускоренный разгар футеровки и прогар холодильников, настылеобразование и т.п.).

В связи с этим характер и величина внутренних нагрузок и воздействий, воспринимаемых кожухами доменных печей, носят нестабильный,

© Иосилевич Е.С.

изменяющийся во времени, характер и зависят от длительности их эксплуатации, этапа технологического процесса и режима его ведения.

Кожухи воздухонагревателей работают в условиях достаточно стабильных по величине нагрузок и воздействий. Однако, несмотря на схожесть основных нагрузок на их кожухи с нагрузками на кожухи доменных печей, характерной отличительной особенностью работы воздухонагревателей является циклическое чередование двух разнохарактерных технологических режимов – «нагрев» и «дутье». При переходе с одного режима на другой происходит изменение внутреннего давления и температуры внутренней воздушной среды:

- $P = 0$ – температура при остывшем воздухонагревателе – режим «нагрев»;
- $P = P_{max}$ – температура при нагретом после режима «нагрев» воздухонагревателе – режим «дутье».

Процессы «нагрев» и «дутье» длятся примерно 3–4 часа. Количество циклов, приводящих к нестационарному напряженному состоянию в кожухе, изменению нагрузки, составляет в течение года 2–3 тысячи.

Таким образом, учитывая особенности работы металлоконструкций кожухов технологических агрегатов доменного комплекса, а также значительное влияние их стабильной безаварийной эксплуатации на общую промышленную безопасность комплекса доменной печи в целом, можно сделать вывод о том, что применение только расчетно-теоретических методов для анализа работы кожухов доменных печей и воздухонагревателей оказывается недостаточным по причине невозможности составления исходных предпосылок расчета без экспериментального определения их эксплуатационной нагруженности.

Принципы дислокации точек контроля. Оснащение кожухов доменных печей и воздухонагревателей измерительными системами осложняется рядом особенностей конструкции этих сооружений, в т.ч. их специфической формой и большими размерами контролируемой поверхности, исчисляемой сотнями квадратных метров, невозможностью доступа к металлоконструкциям изнутри при работе агрегатов под давлением и при высоких температурах, а также тяжелыми условиями их эксплуатации (повышенная температура кожуха и окружающей среды, наличие загазованности агрессивными газами, недоступность для монтажа и обслуживания мест установки приборов в связи с наличием большого количества технологического оборудования).

Кроме того, анализ напряженно-деформированного состояния кожуха ДП затруднен неравномерным распределением нагрузок и воздействий как в кольцевом, так и в меридиональном направлениях. Это связано с разгаром и пластическими деформациями футеровки, которые изменяют условия работы стального кожуха, воспринимающего нагрузку от температурного распора огнеупорной кладки. На общем фоне снижения уровня воздействия кладки возникают локальные участки с повышенным давлением, перегревом кожуха и, соответственно, с повышенными напряжениями.

Все эти факторы вызывают различного характера локальные возмущения напряженного состояния, точно прогнозировать места возникновения которых не представляется возможным. В связи этим, расчетное напряженное состояние кожуха ДП рассматривается только в идеализированном виде, в качестве критерия которого принимается максимальный уровень напряжений.

Для получения максимально достоверной картины изменения НДС кожуха ДП датчики деформаций, как правило, устанавливаются на представительных участках, позволяющих судить об общем НДС кожуха. Такими участками (зонами контроля) являются лещадь, горн и фурменная зона, где температура внутри печи максимальная и где, собственно, реализуется технологический процесс получения чугуна.

В каждой из зон контроля располагают, как правило, 8–12 преобразователей линейных кольцевых и меридиональных деформаций и по 4–6 поверхностных датчиков температуры. В одной из зон дополнительно размещают 4–6 преобразователей радиальных деформаций, фиксирующих деформации контура поперечного сечения кожуха и позволяющие сопоставить эти величины с результатами показаний преобразователей. Различное количество преобразователей в зонах контроля обусловлено наличием свободного места на конструкции. Точки измерений расположены по сечению кожуха практически равномерно.

Напряжения в точках кожуха печи ДП, расположенных между датчиками, могут отличать-

ся и даже превышать измеренные напряжения, что, как отмечено, связано с неравномерным распределением нагрузок и воздействий, а также возможными концентраторами напряжений. Однако тенденции роста напряжений будут зафиксированы установленными датчиками.

Полученные дискретные величины измеренных напряжений принимаются за основу для определения средних и выявления экстремальных напряжений и оценки общего уровня НДС кожуха ДП.

Основываясь на ранее выполненных исследованиях, НДС кожуха ВН, в отличие от кожуха ДП, с определенной степенью приближения можно считать равномерным в каждом кольцевом сечении, но нестабильным по высоте сооружения. Это обстоятельство определяет расположение зон контроля по высоте кожуха ВН:

- сопряжение сферического купола с верхом высокотемпературной цилиндрической зоны, футеровка которой состоит из динасовых огнеупоров;
- сопряжение футеровки из огнеупоров с различными физико-механическими характеристиками (динасовых и каолиновых, каолиновых и шамотных);
- ось штуцера холодного дутья.

С учетом относительной стабильности кольцевых напряжения и предположения такой же стабильности температуры кожуха, в каждой из зон контроля располагают 3–4 точки измерения линейных кольцевых и меридиональных деформаций.

Методы проведения измерений. Одной из основных проблем в процессе оценки напряженного состояния кожухов, как и большинства эксплуатируемых конструкций, является определение начальных «нулевых» напряжений, т.е. напряжений, существовавших в конструкции до момента проведения измерений. Измерения под нагрузкой, проводимые различными способами без знания начальных параметров, дают лишь информацию о приращении напряжений и деформаций по отношению к некоторому исходному состоянию. В том случае, когда первоначальное состояние конструкции близко к ненапряженному измеряемые приращения напряжений и деформаций близки к действительному НДС.

В условиях капитальных ремонтов, когда кожух доменной печи (воздухонагревателя) освобождается практически от всех нагрузок, создаются благоприятные условия для определения «нулевых» параметров. В связи с этим методика проведения измерений, как правило, имеет следующие особенности: перед пуском печи на кожухе снимаются начальные показания датчиков температуры и напряжений (деформаций); после задувки печи показания снимаются, как правило, многократно, через определенные промежутки времени. Таким образом, определяются напряжения в период эксплуатации и создается картина их изменения во времени.

Такая же методика используется и при изучении НДС кожухов воздухонагревателей.

Известен также метод контроля путем применения длиннобазных датчиков, разработанный в проектном институте «Днепрпроектстальконструкция» (г. Днепропетровск). Метод заключается в т.н. «обезгруживании» и позволяет ориентировочно оценить уровень действующих напряжений в кожухе технологического агрегата, находящегося в поле напряжений. В основе этого метода лежит представление о том, что НДС конструкции включает в себя напряжения от эксплуатационных нагрузок и напряжения, возникшие в процессе изготовления и монтажа, а также сварочные напряжения.

Метод состоит в том, что после серии измерений в различных режимах работы участок кожуха, содержащий точку измерений, вырезается механическим инструментом, практически исключающим наклеп металла в месте реза, после чего происходит его «разгрузка» и снимаются напряжения, действовавшие при эксплуатации. Оставшиеся напряжения имеют самоуравновешенную эпюру и в расчет не принимаются. Измеренные на «обезгруженном» участке деформации принимаются за начальные (нулевые), соответствующие отсутствию напряженного состояния. Добавки, полученные при измерениях на кожухе работающего агрегата, определяют действительное напряженное состояние кожуха в контролируемых точках.

Указанный метод неоднократно применялся для оценки уровня НДС кожухов ВН при переводе их на повышенные эксплуатационные параметры.

Критерии оценки НДС кожухов. Основными критериями, определяющими промышленную безопасность кожуха, можно считать уровень НДС и температуру его поверхности.

Если обозначить величину поля суммарных фактических напряжений в кожухе или температуры его поверхности N, а критическое значение этих величин, с учетом ответственности сооружения, Ф, то очевидно, что промышленная безопасность кожуха обеспечивается при соотношении $N \leq \Phi$.

При этом величины, описываемые индексом N, определяются их инструментальными измерениями на действующем агрегате.

В этой связи особое значение приобретает разработка системы критериев (допускаемых пороговых значений), обеспечивающих промышленную безопасность сооружения с учетом требований ДБН В.1.2-14-2009 «Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ». Использование системы таких критериев дает возможность сопоставлять с ними результаты инструментальных измерений НДС и температуры оболочки кожуха. Методика определения критериев промышленной безопасности кожуха основана на его расчете по безмоментной теории тонкостенных составных оболочек с учетом следующих основных положений и допущений:

- нагрузки от температуры, внутреннего давления предполагаются осесимметричными, температура внутри агрегата по ее высоте распределяется согласно задаваемому закону, температура в расчетных сечениях определяется по линейной интерполяции;
- изменение температуры по толщине огнеупорного слоя футеровки принимается по линейному закону, температура холодильников для кожуха ДП задается различной в зависимости от их типа и состояния футеровки;
- величина давления на слои определяется решением системы линейных алгебраических уравнений, основанных на условии совместной деформации слоев;
- модуль упругости, коэффициент линейного расширения, коэффициент Пуассона и коэффициент теплопроводности стального кожуха в диапазоне рабочих температур принимаются постоянными;
- модуль упругости, коэффициент линейного расширения и коэффициент теплопроводности футеровки являются функциями температуры, коэффициент Пуассона футеровки принимается равным нулю, т.е. футеровка работает только на сжатие;
- компенсационные слои воспринимают только радиальные сжимающие напряжения, причем зависимость между радиальной деформацией и напряжением принимается нелинейной и определяется коэффициентами податливости, имеющими различные значения для различных материалов и изменяющимися в зависимости от величины напряжений;
- для кожуха ДП рассматриваются два расчетных состояния футеровки в процессе эксплуатации: на первом этапе работы печи – футеровка цела, на втором этапе – футеровка выгорела и кожух работает совместно с холодильниками, и силовое влияние гарнисажа при этом не учитывается;
- напряжения от внешних нагрузок не учитываются.

В кожухе учитываются кольцевые и меридиональные напряжения, суммируя которые определяются расчетные значения приведенных напряжений

$$\sigma_{\text{пр}} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \leq \gamma_c R_y,$$

где σ_1 и σ_2 – соответственно суммарные кольцевые и меридиональные напряжения

$$\sigma_2 = (\sigma_{xp} + \sigma_{xt})K_x^{\text{осл}};$$

$$\sigma_1 = (\sigma_{yp} + \sigma_{yt})K_y^{\text{осл}},$$

где σ_{xp} и σ_{yp} – компоненты кольцевых и меридиональных напряжений от факторов внутреннего давления; σ_{xt} и σ_{yt} – компоненты кольцевых и меридиональных напряжений от температурного роста огнеупорной кладки, а для кожуха ДП – огнеупорной кладки и холодильников; $K_x^{\text{осл}}$ и $K_y^{\text{осл}}$ – коэффициенты ослабления кожуха отверстиями в кольцевом и в меридиональном направлении; γ_c – коэффициент условий работы конструкции; $\gamma_{\text{н}}$ – коэффициент надежности конструкциии; R_y – расчетное сопротивление металла кожуха.

Поскольку кожух находится в условиях двухосного напряженного состояния, расчетное сопротивление металла кожуха R_y (вне зон краевого эффекта) допускается повышать путем умножения его на коэффициент $K_{\text{м}}$, зависящий от соотношения σ_1 и σ_2,

$$K_{\text{м}} = 1 \Big/ \sqrt{1 - \eta + \eta^2},$$

где η – коэффициент, изменяемый в пределах $1 \geq \eta = \sigma_1/\sigma_2 \geq (-1)$.

Из приведенных выше соотношений видно, что определяющим критерием для оценки прочности конструкции служит величина расчетного сопротивления, равная пределу текучести металла, деленному на коэффициент надежности по материалу γ_m.

При определении пороговых значений состояния кожуха следует исходить из величины предельных значений критериев его состояния:

- предела текучести и соответствующего ему расчетного сопротивления материала кожуха, определяющего его механическую прочность;
- предельных деформаций кожуха;
- предельной температуры поверхности кожуха.

Исходя из величины предела текучести материала кожуха $\sigma_т$ с учетом всех перечисленных выше коэффициентов, может быть определено пороговое значение предельных приведенных напряжений:

$$\sigma_{пр}^{max} = \sigma_т \cdot \gamma_c \cdot \gamma_н \cdot K_{осл} / \gamma_m .$$

В качестве критерия, характеризующего максимально возможный уровень напряжений, можно принять достижение приведенными кольцевыми и меридиональными напряжениями и температурой поверхности предельных пороговых значений.

Ввиду сложности формализации всех действующих на кожух нагрузок, а также влияния на его НДС факторов, обусловленных особенностями конструктивных форм (наличие конических, а для ВН и сферических, участков оболочки и переломов профиля, обуславливающих возникновение краевого эффекта, большого числа вырезов, ослабляющих поперечное сечение кожуха и т.п.), критерии общего НДС, применяемые для оценки его промышленной безопасности, требуют определенной идеализации.

Интегральной оценкой уровня НДС может также служить увеличение радиуса поперечного сечения кожуха, связанное с его деформацией. Для определения порогового значения по критерию максимальных радиальных деформаций в качестве исходных данных приняты максимальные приведенные напряжения $\sigma_{пр}^{max}$ и максимальные кольцевые напряжения $\sigma_2 = 0{,}8\sigma_т$, а также усредненный радиус кожуха печи r и толщина его стенки t.

Исходя из внутреннего давления, соответствующего максимальным кольцевым приведенным напряжениям и, учитывая, что $\sigma_2 = Pr/t$, а $\sigma_1 = 0{,}5\sigma_2 = Pr/(2t)$, величина приведенных напряжений в кожухе составляет:

$$\sigma_{пр} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} = \sqrt{3/4} \cdot P\,r/t ,$$

а величина максимального суммарного внутреннего давления на кожух равна:

$$P = \sigma_{пр} \cdot t / (r\sqrt{3/4}) .$$

Приращение радиуса кожуха при этом составляет:

$$\Delta r = P\,r^2 / Et .$$

Согласно нормативным и инструктивным материалам, а также исходя из опыта эксплуатации, в качестве пороговых значений температуры поверхности кожухов можно принять:

- для кожухов ДП – $t_{max} \geq 100$ °С;
- для кожухов ВН – $t_{max} \geq 120$ °С.

Сравнение сформулированных выше критериев с результатами натурных измерений позволяет установить уровень фактического НДС металлоконструкций кожухов в процессе эксплуатации.

Надійшла 05.11.2015 р.

ДО ВІДОМА ДОПИСУВАЧІВ ЖУРНАЛУ !

Вимоги щодо публікації статей:

- Текст статті в електронному виді, фото авторів, авторська довідка (для наукових статей ще анотація мовою статті та англійською, ключові слова, УДК), підготовлені у Microsoft Word, а також у роздрукованому виді.
- Ілюстрації надаються підготовленими у Adobe Photoshop або Microsoft Word, Excel чи на паперових носіях для сканування. Формат надання – tif, eps, jpg, pcx – 300 dpi.
- Роздрукований текст статті підписується усіма авторами, електронні та роздруковані варіанти повинні бути ідентичними.
- Авторська довідка має містити наступні дані: прізвище, ім'я та по батькові повністю, місце роботи, посада, науковий ступінь, вчені звання, а також номер контактного телефону та електронну адресу.

ЖУРНАЛ МОЖНА ПЕРЕДПЛАТИТИ
У БУДЬ-ЯКОМУ ВІДДІЛЕННІ ДП «ПРЕСА»
(передплатний індекс – 98848)
АБО ЗАМОВИТИ У РЕДАКЦІЇ ЖУРНАЛУ

Видавець ТОВ «Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського»

Рекомендовано до друку вченою радою ТОВ «Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського» (протокол № 1 від 25.02.2016 р.)

Адреса редакції та видавця: вул. В. Шимановського, 2/1, Київ, 02660, ТОВ «Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського»
тел. (044) 516-52-85, e-mail: redakpbis@urdisc.com.ua

Оригінал-макет підготовлений редакцією журналу «Промислове будівництво та інженерні споруди»
Комп'ютерна верстка та дизайн – **Цапро Т.І.**
Дизайн обкладинки – **Артюшенко В.С.**

Підписано до друку 25.02.2016 р. Формат 60 × 84/8. Папір крейдяний. Друк офсетний. Ум.-друк. арк. 8,1.
Тираж 300 прим.
Віддруковано ТОВ «Поліпрінт», вул. Лугова, 1-А, м. Київ, 04074, тел. 464-17-91
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1250 від 22.02.2003 р.

* **Оформлення, стиль та зміст журналу є об'єктом авторського права і захищається законом**
* **Передрук розміщених у журналі матеріалів дозволяється тільки за письмовою згодою редакції**
* **Відповідальність за підбір та висвітлення фактів у статтях несуть автори**
* **За зміст реклами відповідає подавач**
* **Редакція не завжди поділяє думку авторів**
* **Редакція залишає за собою право редагувати та скорочувати подані матеріали**

Вітаємо із 80-річчям

СИТНИКА МИКОЛУ ПЕТРОВИЧА

академіка Української академії наук, Підйомно-транспортної академії наук України та Академії будівництва України, доктора технічних наук, заслуженого винахідника Української РСР, лауреата Державних премій СРСР та України, директора ТОВ «Науково-технічний центр «Монтажспецтехніка»

Народився Микола Петрович 19 січня 1936 р. у м. Глухів на Сумщині. У 1959 р. закінчив із відзнакою Українську сільськогосподарську академію за спеціальністю «Машини і механізми лісової промисловості».

Трудову діяльність розпочав у 1959 р. з посади інженера київського заводу «Будшляхмаш», у 1960–1967 рр. працював у Державному спеціальному конструкторському бюро по сільгоспмашинах. Протягом 1967–1992 рр. був головним конструктором інституту «Укрспецмонтажпроект» Міністерства монтажних і спеціальних будівельних робіт України, заступником директора. Упродовж 1993–1995 рр. обіймав посаду директора Науково-виробничої фірми «Винахідник ЛТД». У 1995–2005 рр. М.П. Ситник – генеральний директор спільного українсько-російського підприємства ЗАТ «Монтажспецтехніка», а з 2005 р. – директор ТОВ «Науково-технічний центр «Монтажспецтехніка».

Маючи високу професійну кваліфікацію інженера і талант винахідника, неодноразово входив до складу творчих колективів різних науково-дослідних установ та організацій для вирішення найскладніших проблем зі створення нової техніки для будівельного комплексу. Так спільно із провідними спеціалістами Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона та Інституту «Укрпроектстальконструкція» брав участь у розробленні вперше у вітчизняній і зарубіжній практиці нової технології будівництва суцільнозварної вежі Київського телецентру з використанням нового методу підрощування та застосуванням спеціального устаткування для його здійснення, де було впроваджено чотири винаходи Миколи Петровича.

Також за його винаходами у 1979 р. у м. Дніпропетровськ шістьома гідравлічними підйомними установками було змонтовано покриття тренувального катка площею 3100 м^2 і вагою 600 т, а у 1982 р. двома гідравлічними підйомниками – прогонову будову крана-перевантажувача прогоном 120 м і вагою 400 т на Центральному гірничозбагачувальному комбінаті у м. Кривий Ріг, де було впроваджено три винаходи Миколи Петровича, а також низку інших об'єктів.

За розроблення нової технології та устаткування для монтажу металевих конструкцій будівельного комплексу об'єктів для створення літака АН-124 («Руслан»), де впроваджено шість винаходів М. П. Ситника, в 1983 р. нагороджений Грамотою Президії Верховної Ради Української РСР, а у 1984 р. йому та групі авторів присуджено Державну премію СРСР у галузі науки і техніки.

У 1994–1995 рр. за участю М.П. Ситника та з використанням його патенту були успішно виконані роботи з вирівнювання будівельних конструкцій зали для глядачів Київської державної філармонії, що дозволило зберегти унікальні акустичні властивості приміщення.

За розробку наукових основ та принципів побудови експлуатаційно надійних конструкцій магістральних електромереж, освоєння їх виробництва та впровадження Миколі Петровичу та групі авторів присуджено Державну премію України у галузі науки і техніки (2002 р.).

Микола Петрович Ситник – член президії та керівник галузевого відділення Академії будівництва України. Має численні нагороди, серед яких орден «Знак пошани», орден Богдана Хмельницького.

За розроблення нормативно-технічних документів щодо виготовлення, експлуатації, експертного обстеження (технічного діагностування) та ремонту підіймальних споруд та будівельних машин Ситнику М.П. та групі фахівців відділення була присуджена премія Академії будівництва України імені академіка М.С. Буднікова.

Микола Петрович – автор 177 друкованих праць, має 92 авторських свідоцтва про винаходи колишнього СРСР та 15 патентів України, член ради та член президії Сумського земляцтва, член Глухівського земляцтва, член редакційної колегії наукового журналу «Винахідник і раціоналізатор», почесний громадянин Глухова.

Щиро зичимо Миколі Петровичу міцного здоров'я та творчого довголіття!

КОРПОРАЦИЯ «ПРОМСТАЛЬКОНСТРУКЦИЯ»

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ОБСЛЕДОВАНИЕ, ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И МОНИТОРИНГ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ, ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Адрес: пр. Пушкина, 49, оф. 504, г. Днепропетровск, Україна, 49006
Тел.: (056) 790-03-60, 790-03-61; Факс: (056) 370-38-48
E-mail: promstalkon@gmail.com; postbox.psk@gmail.com