

11.5.1.5 НОМ «Обеспечение безопасности и мониторинга большепролетных и высотных зданий в ходе эксплуатации»

Лекция 1

1.1. Анализ причин возникновения деформаций сооружений в ходе проведения строительства и эксплуатации объектов в сложных инженерно-геологических условиях.

1.1.1. Система «основание-сооружение».

Строительный объект - это многокомпонентная система взаимодействующих конструктивных элементов, работоспособность и техническое состояние каждого из которых определяет прочность, устойчивость и эксплуатационную безопасность сооружения в целом на всех этапах его возведения и функционирования. Всю систему элементов в общем виде можно представить двумя основными группами: основание – сооружение, или, при более детальном членении, в следующем виде: основание – фундамент – надфундаментные конструкции. Данная система существует в условиях взаимодействия всех своих компонентов.

В период своего жизненного цикла компоненты системы подвергаются различного рода воздействиям, как плановым (эксплуатационные нагрузки, природно-климатические изменения), так и внеплановым (техногенным) воздействиям со стороны окружающей среды и внешней инфраструктуры, в том числе аварийные ситуации, что особенно характерно для сооружений, располагающихся в стесненных условиях мегаполисов (рис. 1.1).

Возникновение различного рода деформаций и повреждений несущих и ограждающих конструкций (далее конструкций) строительных объектов сигнализирует о появлении отклонений от заложенных на стадии проектирования параметров нормального функционирования системы.

Надфундаментные конструкции сооружения призваны взаимодействовать с грунтами основания посредством фундаментных

конструкций таким образом, чтобы удовлетворялись все необходимые нормативные требования по обеспечению несущей способности конструкций сооружения. При отклонениях от запланированной схемы взаимодействия система «основание–сооружение», воспринимая помимо проектных нагрузок дополнительные внеплановые воздействия, обусловленные различными причинами, испытывает, в первую очередь, неоднородные деформации, что вызывает появление в элементах сооружения дополнительных перемещений и внутренних усилий. Появление и рост с течением времени величин деформаций до критических значений приводит к снижению и даже к потере работоспособности отдельных элементов конструкций, что в дальнейшем может быть причиной полного отказа строительного объекта.

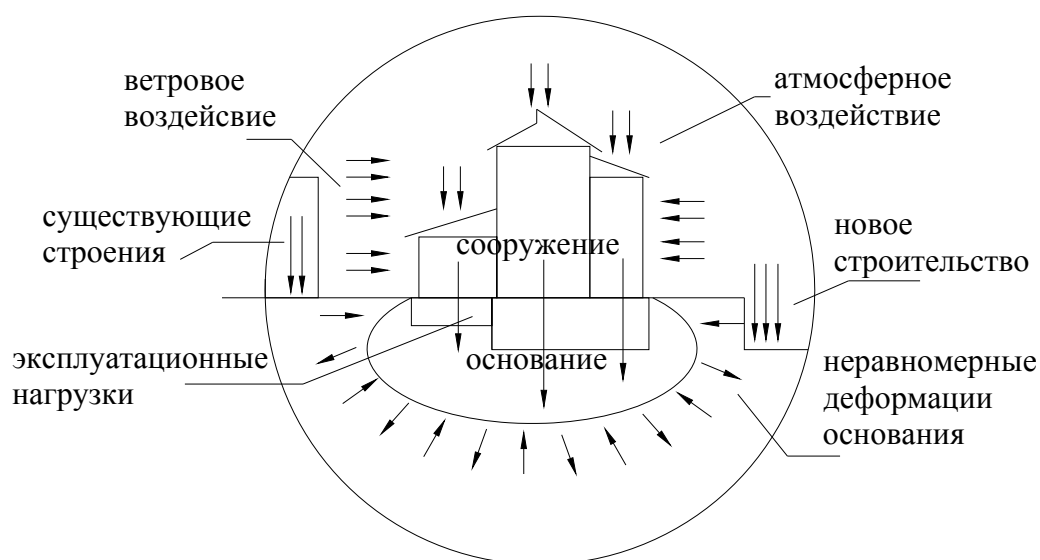


Рис. 1. Схема взаимодействия системы «основание-сооружение» с окружающей средой мегаполиса.

Накопленный опыт строительства и эксплуатации строительных объектов свидетельствует о том, что изменение условий нормального функционирования, сопровождающееся повреждениями конструкций, может быть вызвано самыми разнообразными причинами. К ним, в первую очередь, относятся внешние воздействия природно-климатического или техногенного характера, например неравномерные деформации основания, спровоцированные изменением инженерно-геологических условий или

несоблюдением проектных условий эксплуатации, в частности, превышения эксплуатационных нагрузок (накопление снеговых мешков на кровле, излишняя концентрация оборудования или скопление людей в зонах, для этого не предусмотренных и т.д.). К числу наиболее опасных причин относится наличие технических ошибок и технологических дефектов, допущенных в ходе проектирования и строительства. Их присутствие способно привести к аварийной ситуации даже при нагрузках ниже эксплуатационных. В отдельную группу причин необходимо выделить экстремальные воздействия, носящие случайный катастрофический характер.

Систематизируя изложенное, можно выделить четыре основные группы причин возникновения аварийных ситуаций.

1. Внешние техногенные и природные воздействия:
 - неравномерные деформации основания;
 - динамические воздействия (транспорт, оборудование).
2. Изменение плановых условий эксплуатации:
 - изменение или превышение эксплуатационных нагрузок;
 - износ и изменение свойств материалов конструкций.
3. Технические ошибки и технологические дефекты:
 - наличие проектных ошибок;
 - несоблюдение проекта и технологические дефекты, допущенные в ходе строительства.
4. Экстремальные воздействия:
 - пожар;
 - взрыв, террористический акт.

Даже если перечисленные воздействия не приводят непосредственно к аварийной ситуации, то, в целом, при накоплении повреждений надежность конструкций сооружения падает, что, в свою очередь, повышает вероятность аварийного отказа (рис. 2). Из этого следует, что мероприятия по восстановлению нормативного технического состояния конструкций объекта

экономически целесообразно предпринимать до момента, когда вероятность отказа становится выше показателя надежности конструкций сооружения.

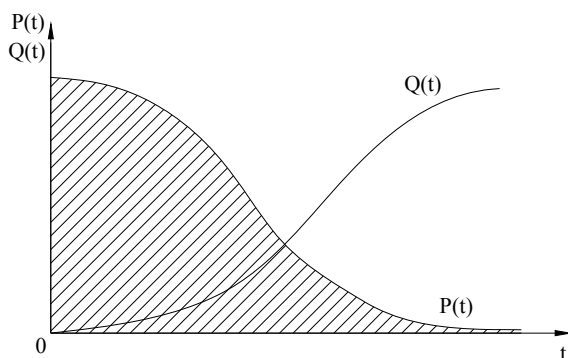


Рис. 2. Зависимость надежности $P(t)$ конструкций и вероятности $Q(t)$ отказа от времени эксплуатации.

В случае отсутствия явно выраженного источника возникновения повреждений сооружения выявление всех взаимосвязанных причин, вызывающих снижение характеристик несущей способности конструкций, является задачей, требующей комплексного подхода к исследованию состояния объекта в целом с учетом взаимодействия всех его компонентов/ Подобная задача является предметом комплексного инженерного обследования проблемного сооружения.

1.1.2. Неравномерные деформации основания и их влияние на систему «основание-сооружение».

Исследование влияния причин, приводящих к снижению или потере несущей способности конструкций строительных объектов в ходе эксплуатации, показывает, что одними из основных причин являются неблагоприятные природно-техногенные воздействия на систему «основание-сооружение», вызывающие деформации грунтового основания и, как следствие, повреждения фундаментных и надфундаментных конструкций объекта.

Равномерные деформации основания, в целом, не снижают прочности и устойчивости конструкций самого сооружения, они развиваются в течение довольно больших временных интервалов и, в основном, влияют на

состояние инженерных сетей и коммуникаций, связывающих объект с окружающей инфраструктурой.

Неравномерные деформации основания провоцируют возникновение дополнительных деформаций и усилий в элементах конструкций, изменяют их напряженно-деформированное состояние (НДС), что приводит к повреждениям и ухудшению технического состояния как самих конструктивных элементов, так и всего объекта в целом.

Следует отметить, что деформации основания, как правило, носят пространственный характер, но в соответствии с действующими нормативно-техническими документами их принято подразделять на вертикальные и горизонтальные перемещения. Вертикальные перемещения, в свою очередь, подразделяются на осадки, просадки, усадки, оседания, подъемы и т.д.

Классификация основных видов деформаций оснований в зависимости от направления воздействия на конструкции сооружений и причин их возникновения приводится в таблице 1.1.

Рассмотренные в таблице 1.1 виды неравномерных деформаций основания наиболее характерны для зданий и сооружений, расположенных в крупных городах, особенностями которых являются:

- активная жизнедеятельность мегаполисов, постоянная застройка территорий или реконструкция объектов, перераспределение или увеличение эксплуатационных нагрузок на фундаменты и конструкции в процессе возведения или эксплуатации объектов (перепланировка, изменение этажности здания или его функционального назначения);
- плотная застройка территорий, расположение на проблемной территории участков зданий и сооружений разной этажности, передающих различные по величине нагрузки на основание;
- стесненность строительных площадок, возможность повреждения существующих объектов, прилегающих к зоне проведения земляных работ;
- сложность инженерно-геологической обстановки, в том числе неоднородность грунтов в пределах пятна застройки, залегание под контуром

здания грунтов, обладающих различными физико-механическими свойствами и неодинаково реагирующих на негативные природно-технологические воздействия;

- насыщенность подземными инженерными коммуникациями и т.д.

Таблица 1

Виды неравномерных деформаций основания и причины их возникновения	
<i>Горизонтальные</i>	<i>Вертикальные</i>
<p>Смещения, сдвиги 1) действие горизонтальных сил</p> <ul style="list-style-type: none"> • боковое давление (воды, грунта, ветра) <p>2) большие вертикальные перемещения поверхности при оседаниях, просадках и т.п.</p> <p>3) истощение несущей способности грунтов</p> <p>4) оползневые явления</p>	<p>Осадки – вертикальные перемещения вниз</p> <p>1) уплотнение грунтов основания под нагрузкой</p> <ul style="list-style-type: none"> • действие собственного веса грунта • внешние воздействия вне пределов сооружения <p>Просадки – быстрые и значительные осадки</p> <p>1) разуплотнение грунтов</p> <ul style="list-style-type: none"> • внешние техногенные воздействия (аварии коммуникаций) <p>2) коренное изменение структуры грунта, карстовые явления</p> <ul style="list-style-type: none"> • растворение водой некоторых пород грунтов (гипс, каменная соль, известняк) • замачивание просадочных грунтов • оттаивание мерзлых грунтов <p>Усадка – перемещение вниз</p> <p>1) изменение объема грунтов при химических и физических воздействиях</p> <ul style="list-style-type: none"> • усадка при уменьшении влажности грунтов <p>Оседание – перемещение вниз</p> <p>1) подземные работы</p> <ul style="list-style-type: none"> • разработка полезных ископаемых • некачественное возведение подземных сооружений <p>2) резкие изменения гидрогеологических условий территории</p> <ul style="list-style-type: none"> • понижение уровня подземных вод • карстово-суффозионные процессы <p>Подъемы – перемещение вверх, пучение</p> <p>1) изменение объема грунтов при химических и физических воздействиях</p>

	<ul style="list-style-type: none"> • набухание при увеличении влажности или действие химических веществ • морозное пучение при промерзании влажных грунтов • выемки грунта под рытье котлована
--	---

Степень воздействия неравномерных деформаций основания на сооружение зависит от многих факторов, таких как тип сооружения, конструктивная схема, пространственная жесткость и др. По степени чувствительности конструкций к неравномерным деформациям основания сооружения условно делятся три основные группы, определяющие характер совместной работы основания – фундаментов – надфундаментных конструкций (рис. 1.3).

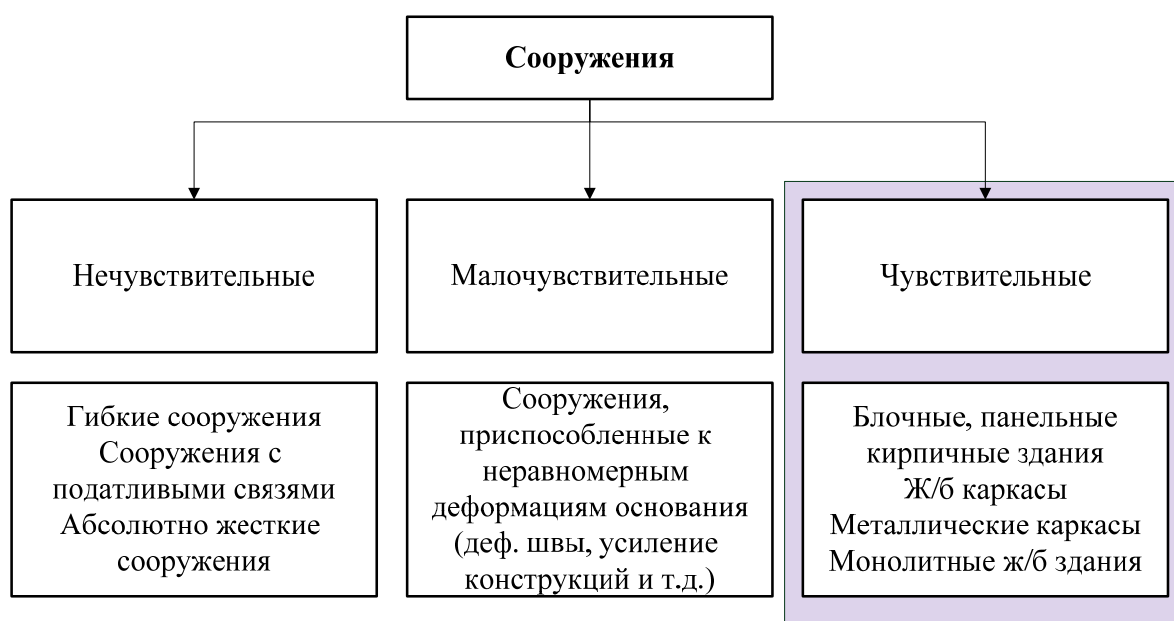


Рис. 3. Классификация сооружений в зависимости от чувствительности их конструкций к неравномерным деформациям основания.

Практически нечувствительные сооружения. К таким объектам относятся гибкие сооружения, которым свойственна беспрепятственная совместная осадка с основанием и практически полное отсутствие появления при этом дополнительных усилий в конструкциях. В качестве примера таких сооружений можно привести земляные насыпи, днища металлических резервуаров, эстакады, галереи с разрезными пролетными строениями и т.д.

К этой группе объектов можно также отнести абсолютно жесткие сооружения (массивные мостовые опоры, дымовые трубы и другие компактные в плане сооружения, установленные на массивном фундаменте). Осадка сооружения и основания в определенных пределах происходит единым целым без взаимных смещений конструктивных элементов, достаточная прочность которых позволяет беспрепятственно воспринимать дополнительные усилия.

К объектам с податливыми системами конструкций относят каркасы одноэтажных зданий на отдельных фундаментах с шарнирными узлами, различные разрезные рамные, арочные конструкции и т.д.

Малочувствительные сооружения. К ним относятся сооружения, на которых проводились специальные мероприятия, такие как усиление элементов конструкций, разрезка на жесткие отсеки, устройство поясов, усиление подземной части и т.д., что позволяет данным сооружениям быть также приспособленными к воздействию неравномерных деформаций основания.

Чувствительные сооружения. К таким объектам относят большинство гражданских и промышленных зданий и сооружений (монолитные железобетонные каркасы, рамные и неразрезные железобетонные конструкции, металлические каркасы с жесткими узлами, кирпичные, блочные, панельные дома и т.п.). При неравномерных деформациях основания пространственная жесткость, до некоторой степени уменьшающая их влияние на конструкции, становится недостаточной для обеспечения смещения сооружения и основания как единого целого. Последующее деформирование сооружения приводит к изменению расчетной схемы работы конструкций, дополнительные усилия и деформации вызывают появление повреждений и даже разрушение отдельных элементов.

Процесс совместной деформации системы «основание – фундамент – надфундаментные конструкции» может характеризоваться различными формами, определение и анализ величин которых позволяет судить о степени проявления деформационного воздействия (табл. 2).

Таблица 2

Формы проявления неравномерных деформаций основания	
Форма	Определение
Абсолютная осадка	Изменение высоты отдельных точек сооружения
Средняя осадка	Среднее изменение высоты не менее чем 3-х точек сооружения
Разность осадок	Разность осадок соседних точек (характеризует неравномерность осадки)
Перекося (относительная разность осадок)	Разность осадок соседних точек, отнесенная к расстоянию между ними (характеризует неравномерность осадки)
Сдвиг (горизонтальное смещение)	Изменение планового положения отдельных точек
Крен	Наклон или поворот плоскостей сооружения, выраженный в угловой, линейной или относительной мере
Крен сооружения	Отклонение вертикальной оси сооружения
Крен фундамента	Отклонение плоскости подошвы фундамента от горизонта
Относительный прогиб (выгиб)	Частное от деления величины стрелы прогиба или выгиба к длине однозначно изгибаемого участка сооружения
Кручение	Возникает при неравномерных осадках по торцам сооружения, имеющих разное направление
Трещины	Разрывы в конструкциях сооружения

Неравномерные деформации основания, воздействуя на сооружение, вызывают взаимосвязанные внешние и внутренние изменения состояния конструкций объекта, которые численно могут описываться изменениями параметров их НДС на определенном этапе эксплуатации.

Видимые внешние признаки деформационного воздействия

- пространственная деформация конструкций (вертикальные, горизонтальные перемещения, прогибы, крены);
- видимые повреждения конструкций (образование, последующее раскрытие и увеличение трещин, образование областей смятия, разрушения).

Скрытые внутренние признаки деформационного воздействия

- дополнительные усилия в конструкциях (изгибающие моменты, продольные, поперечные силы в разных плоскостях);
- внутренние повреждения конструкций (в зонах концентрации напряжений);
- изменение свойств материалов конструкций;
- изменение глобальных характеристик сооружения.

1.2. Анализ содержания мониторинга технического состояния конструкций сооружений.

1.2.1 Перечень и содержание работ в составе мониторинга при контроле изменений технического состояния конструкций сооружений.

Оценка технического состояния конструкций зданий и сооружений имеет основной целью обеспечение их безопасной эксплуатации на основании соответствия их фактической прочности, жесткости, устойчивости нормативным требованиям. Для достижения этой цели изменения механических и физических характеристик конструкционных материалов, параметры действующих нагрузок, НДС элементов конструкций, образование дефектов и повреждений требуют регулярного технического диагностирования в течение всего периода эксплуатации сооружения.

Своевременное выявление происходящих деформационных процессов и контроль влияния дополнительных воздействий на сооружение позволяют отслеживать изменение технического состояния конструкций с целью предупреждения возникновения аварийных ситуаций, способных привести к серьезным повреждениям вплоть до полной потери несущей способности конструкций объекта, делающую невозможной его дальнейшую эксплуатацию.

Как показывает опыт, неравномерные деформации основания в большинстве случаев являются процессом достаточно растянутым во времени и поэтому могут быть выявлены в ходе инженерного мероприятия,

принятого называться мониторингом технического состояния конструкций зданий и сооружений.

Под мониторингом (от лат. monitor – предостерегающий) в общем случае подразумевается «специально организованное, систематическое наблюдение за состоянием объектов, явлений, процессов с целью их оценки, контроля или прогноза».

В соответствии с нормативно-технической литературой целью мониторинга является обеспечение надежности системы «основание - сооружение», недопущение негативных изменений окружающей среды, разработка технических решений для предупреждения и устранения отклонений, превышающих предусмотренные в проекте, а также осуществление контроля выполнения принятых решений.

По функциональному назначению выделяются такие разделы мониторинга как:

- *объектный* – все виды наблюдений за состоянием оснований, фундаментов и несущих конструкций объектов;
- *геолого-гидрогеологический* – система наблюдений за изменением состояния грунтов, уровней и состава подземных вод, за деструктивными процессами: эрозия, оползни, карстово-суффозионные явления, оседания земной поверхности, а также за состоянием температурного, электрического и других физических полей;
- *эколого-биологический* – системы наблюдений за изменением окружающей природной среды, радиационной обстановки и др.;
- *аналитический* – анализ и оценка результатов наблюдений, выполнение расчетных прогнозов, сравнение прогнозируемых параметров с результатами измерений, разработка мероприятий по предупреждению или устранению негативных последствий вредных воздействий и недопущению интенсивности их воздействий.

Основными задачами мониторинга технического состояния конструкций сооружения являются:

- выявление фактов незапланированных воздействий на сооружение;
- отслеживание образования и развития повреждений в элементах конструкций;
- прогнозирование изменения технического состояния элементов конструкций через контроль их НДС.

На сегодняшний день существующими нормативными документами предусматривается необходимость проведения обязательного мониторинга эксплуатируемых объектов и их грунтового основания, попадающих в зону влияния нового строительства или реконструкции, с целью своевременного выявления и учета изменения геолого-гидрологических, инженерно-геологических, природных и техногенных параметров, определяющих техническое состояние конструкций зданий и сооружений. Для зданий высотой более 75 м и сооружений повышенной ответственности контроль деформационного состояния несущих конструкций является обязательным, а разработка систем стационарного мониторинга должна осуществляться еще на стадии проектирования.

Решение о необходимости проведения мониторинга строительных объектов, не отнесенных к разряду ответственных или проблемных по нормативным документам, принимается на основании обращения владельца сооружения или эксплуатирующей организации, обеспокоенных возможностью возникновения аварийных ситуаций, или по фактам проявления повреждений конструкций различного вида.

В виду возрастающего числа аварий на строительных объектах гражданского и промышленного назначения, вызванных воздействием внешних техногенных факторов в сложных инженерно-геологических условиях, становится очевидным, что эксплуатационная безопасность этих объектов, в первую очередь, зависит от того, применяется ли вообще в ходе эксплуатации процедура мониторинга их технического состояния в целом. В значительной степени их безопасность зависит также от того, насколько эффективна выбранная методика мониторинга.

1.2.2. Анализ основных проблем мониторинга технического состояния конструкций сооружений.

Мониторинг технического состояния конструкций зданий и сооружений является на сегодняшний день достаточно распространенным инженерным мероприятием, но его содержание трактуется и реализуется во многих случаях по-разному. Это связано с недостаточным нормативно-техническим обеспечением и методической базой, регулирующей предметное содержание, состав и методику проведения работ. Основными системными проблемами мониторинга на современном этапе являются:

1. отсутствие единого подхода к предметам мониторинга: «что необходимо измерять?»;
2. выбор состава инструментальных средств и методика проведения измерений в ходе мониторинга;
3. методика трактовки получаемой в процессе мониторинга информации для эффективного прогнозирования возможного развития и предотвращения аварийной ситуации.

В действующей в настоящее время нормативной литературе для проектируемых зданий и сооружений требования к мониторингу в ходе строительства и эксплуатации представлены в общем виде без указания спецификаций предметов мониторинга и аппаратной базы для их контроля. Основной причиной этого является отсутствие единой методики и серийного оборудования для проведения действительно эффективного мониторинга, надежно обеспечивающего достижение поставленных целей.

Таким образом, необходимо констатировать, что для каждого конкретного случая принятие решения о составе мероприятий, предметах и методике проведения мониторинга технического состояния конструкций сооружения является индивидуальной для данного случая и зависящей от многих факторов задачей. Исходя из требований существующих нормативных документов, определяющими факторами являются геотехническая категория объекта, уровень ответственности, конструктивная

схема, состав и конфигурация, плотность окружающей застройки и др. На выбор возможной схемы, состава и порядка проведения мониторинга влияют также технико-экономические показатели, такие как объем затрат и время проведения, а также профессиональная квалификация и технические возможности исполнителей.

Перечисленные проблемы в области мониторинга технического состояния конструкций зданий и сооружений в период их эксплуатации особенно актуальны для объектов, подверженных влиянию неравномерных деформаций основания, что, как отмечалось выше, является одной из основных причин повреждений их конструкций при строительстве и эксплуатации в условиях крупных городов.

Лекция 2

1.1. Анализ методов и средств мониторинга технического состояния конструкций сооружений.

1.1.1. Автоматизированный мониторинг технического состояния конструкций сооружений в непрерывном режиме.

Мониторинг технического состояния конструкций зданий и сооружений в настоящее время может осуществляться в периодическом или непрерывном автоматизированном режиме. Для современного промышленного и гражданского строительства, как в России, так и за рубежом характерны разработка и внедрение в практику разнообразных систем мониторинга конструкций зданий и сооружений, основанных на использовании традиционных методов контроля (геодезический мониторинг) или применении новых передовых технологий, таких как, например, волоконно-оптические измерительные системы или GPS-измерения.

Автоматизированный мониторинг в непрерывном режиме основан на использовании постоянно действующих автоматизированных систем контроля технического состояния конструкций объекта. Данные системы наряду с другими системами контроля инженерных систем объекта (тепло и водоснабжения, пожарной безопасности, климатических условий и т.п.) функционирует в автоматическом режиме с выводом информации на централизованные диспетчерские пункты в соответствии с концепцией так называемого «умного дома». Исходная информация о состоянии объекта при помощи преобразователей различного типа (линейных и угловых перемещений, усилий, напряжений и т.д.) непрерывно собирается на компьютеризированных измерительных приборах в пределах локальных зон. Далее, по локальным компьютерным сетям информация поступает и обрабатывается в централизованном диспетчерском пункте.

Стоимость существующих на сегодняшний день систем непрерывного автоматизированного мониторинга достаточно высока и сопоставима со

стоимостью других инженерных систем сооружения, поэтому на стадии проектирования подобные системы разрабатываются в основном для сооружений повышенной ответственности. Устройство такого рода систем экономически и технически целесообразно производить на стадии строительства объектов. Для уже эксплуатируемых объектов устройство подобных систем связано с рядом проблем, а именно:

- высокая стоимость установки автоматизированной системы после возведения объекта;
- трудность доступа к несущим конструкциям для установки первичных преобразователей измерительных приборов;
- трудоемкость устройства единой сети получения информации, необходимость устройства специальных каналов для прохода кабелей и подготовки помещения для их диспетчерского контроля.

Основные проблемы оценки технического состояния конструкций сооружений при непрерывной автоматизированной системе мониторинга:

- обеспечение достоверности информации о реальном техническом состоянии объекта при контроле с помощью выбранного набора параметров и числа точек измерений;
- техническая сложность обработки и трактовки результатов;
- необходимость обязательного периодического проведения проверочных расчетов в соответствии с требованиями нормативной литературы.

Разработка универсальной методики непрерывного автоматизированного мониторинга технического состояния широкого спектра зданий и сооружений на сегодняшний день далека от завершения и является комплексной научно-технической задачей, охватывающей различные научные и методические аспекты.

1.1.2. Периодический мониторинг технического состояния конструкций сооружений.

Периодический мониторинг, проводящийся по установленному графику, представляет собой специализированное обследование, повторяемое по заранее запланированной программе, основной задачей которого является выявление изменений технического состояния конструкций сооружения с помощью визуального и инструментального контроля ряда параметров сооружения, который может проводиться, в том числе, и с элементами автоматизации. Периодический мониторинг, в целом, является на сегодняшний день менее затратным мероприятием, чем автоматизированный мониторинг, но его методика в силу уже перечисленных выше причин также не является отработанной и нормированной в соответствующих нормативных документах. По этой причине к преимуществам периодического мониторинга следует отнести наличие в его составе достаточного объема работ по визуальному контролю состояния объекта, осуществляемого с наибольшей надежностью, обеспечиваемой непосредственным присутствием специалистов.

В настоящее время развитие инструментальной базы и средств измерений, возможность цифровой обработки результатов и автоматической передачи данных в компьютеры предоставляет возможность выбора разнообразных методов и средств мониторинга, общие характеристики наиболее распространенных из которых приведены в таблице 1].

Для получения объективной информации о влиянии неравномерных деформаций основания на техническое состояние конструкций сооружения необходимо выполнять периодический стандартный набор работ по обследованию, соответствующий для разнообразных строительных объектов требованиям. Данный метод ведения наблюдений не рассматривается как альтернативный, а является основополагающим и обязательным элементом общей системы мониторинга. Таким образом, процедуры обследования и мониторинга существуют в неразрывной связи и являются взаимодополняющими элементами системы контроля технического состояния конструкций объектов.

С целью выбора дополнительного эффективного метода, непосредственно контролирующего влияние дополнительных деформационных воздействий на НДС конструкций сооружения (контроль деформаций, напряжений в элементах конструкций, частот колебаний) на всех этапах его мониторинга, необходимо выявить основные особенности методов, рассмотренных в таблице 1.

Данные методы можно условно разделить на две группы:

- локальные методы – контроль осуществляется выборочно на конструкциях сооружения с использованием технических средств измерений;
- дистанционные методы – определение изменения основных прочностных характеристик конструкций с помощью динамических методов, контроль геометрических параметров объекта с помощью геодезических методов.

Таблица 1

Методы мониторинга технического состояния конструкций сооружений		
1. Обследование технического состояния конструкций		
<i>Средства</i>	<i>Назначение</i>	<i>Особенности</i>
<ul style="list-style-type: none"> • визуальное обследование – выявление участков повреждений конструкций • инструментальные измерения – измерения локальных деформаций конструкций, определение величин раскрытия трещин, контроль свойств конструкционных материалов • обмерочные работы – определение изменения геометрических параметров объектов и несущих элементов, влияющих на изменение их НДС • проверочные расчеты строительных конструкций 	<ul style="list-style-type: none"> • оценка технического состояния конструкций на определенном этапе эксплуатации • определение возможности восприятия конструкциями дополнительных нагрузок и деформаций при возникновении какого-либо дополнительного воздействия 	<ul style="list-style-type: none"> • поэтапное и детальное проведение наблюдений с целью получения наиболее полной информации о техническом состоянии конструкций объекта
2. Определение величин нагрузок, напряжений и деформаций в конструкциях с помощью технических средств измерений		
<i>Средства</i>	<i>Назначение</i>	<i>Особенности</i>
<ul style="list-style-type: none"> • инструменты для измерения деформаций, перемещений (прогибомеры, мессуры, электромеханические измерители перемещений, тензометры, инклинометры, наклонометры, экстензометры, сдвигомеры, отвесы) 	<ul style="list-style-type: none"> • определение нагрузок, напряжений и деформаций конструкций зданий и сооружений в 	<ul style="list-style-type: none"> • возможность объединения электрических датчиков в общую систему контроля состояния конструкций в автоматическом режиме и ведения непрерывного мониторинга для

• датчики нагрузок, напряжений, деформаций (вибрационные датчики, тензорезисторы, волоконно-оптические, акустические датчики)	локальных местах	получения динамики развития деформационных процессов
3. Динамические методы		
<i>Средства</i>	<i>Назначение</i>	<i>Особенности</i>
<ul style="list-style-type: none"> • искусственное возбуждение колебаний (удары, вибраторы) • средства измерений (деформографы, наклонометры, сейсмометры, акселерометры) 	<ul style="list-style-type: none"> • получение информации об изменениях динамических параметров конструкций сооружений (период и логарифмический декремент затухания, основной тон колебаний, анализ изменения передаточных функций регистрация волновых полей), указывающих на изменение НДС конструкций 	<ul style="list-style-type: none"> • схемы наблюдений могут быть достаточно простыми, вплоть до одной точки
4. Геодезические методы		
<i>Средства</i>	<i>Назначение</i>	<i>Особенности</i>
<ul style="list-style-type: none"> • традиционные измерения вертикальных и горизонтальных перемещений (нивелирование, тахеометрия) • стерео- и фотограмметрия • лазерное сканирование • GPS – измерения (спутниковые системы глобального позиционирования) 	<ul style="list-style-type: none"> • дистанционное определение перемещений конструкций объекта (измерение осадок, кренов, прогибов) 	<ul style="list-style-type: none"> • получаемые данные соответствуют состоянию объектов на момент измерений

1.1.3. Технические средства мониторинга нагрузок, напряжений и деформаций в конструкциях сооружений.

Мониторинг технического состояния конструкций, а именно оценку изменения их несущей способности можно производить путем измерения действующих нагрузок на конструкции, компонентов относительных деформаций и перемещений элементов, соответствующих изменению внутренних усилий и напряжений в их сечениях. Для этих целей используются технические средства измерений (приборы, измерительные преобразователи), характеризующиеся набором контролируемых параметров, диапазоном, точностью измерений, чувствительностью, принципом действия и т.д. В таблице 2 приведены основные виды приборов и датчиков для решения различных задач мониторинга.

Принципы проектирования и эксплуатации систем мониторинга конструкций и оснований высотных зданий с использованием различных технических средств (датчиков, измерителей, регистраторов) отражены в работах Айме К.А., Ламперти Р., Николаева С.В., Сухина В.В. и др.

К основным преимуществам использования механических приборов измерения деформаций и перемещений в конструкциях сооружений, таких, например, как инклинометры, прогибомеры и др. можно отнести:

- надежность и точность измерений, широкий измерительный диапазон;
- автономность электрического питания при использовании приборов для одновременных испытаний;
- быстрота установки в местах измерений,

к недостаткам:

- трудоемкость измерения большого количества параметров в ручном режиме с последовательным обходом точек контроля;
- сложность проведения повторных измерений в контролируемых точках при необходимости точной установки приборов.

Таблица 2

Технические средства мониторинга		
<i>Измеритель</i>	<i>Виды</i>	<i>Применение</i>
Динамометры (стационарные, переносные)	Пружинные, гидравлические, электрические	Измерение интенсивности нагрузки
Прогибомеры	Прогибомер Максимова, Емельянова, Аистова.	Измерение деформаций и перемещений
Индикаторы (мессуры)	-	Измерение небольших по абсолютной величине перемещений
Электромеханические измерители перемещений	Пассивные Активные (сельсины)	Измерение и преобразование механических перемещений в электрический сигнал.
Клинометры	Способ жесткого рычага С уровнем С отвесом - маятником Оптический	Измерение малых угловых перемещений элементов
Тензометры	Механические Электрические (Аистова)	Измерения линейных деформаций поверхностных волокон элементов

	Струнные Тензорезисторные	конструкций. Тензометрические датчики контролируют возникновение и рост механического напряжения в стальных и железобетонных элементах сооружений
Сдвигомеры	Тезометр-сдвигомер Аистова	Измерение деформаций сдвига
Отвесы	Прямой, обратный	Определение взаимных горизонтальных смещений точек сооружения, расположенных на одной вертикали.
Инклинометры и наклономеры (стационарные, переносные)	Поверхностные, встраиваемые Маятниковые системы С цифровой индикацией	Системы для контроля смещений и деформаций различных объектов, определение ротационных движений стенок конструкций
Экстенсометры	Одинарные и многоточечные Датчики осадки	Система мониторинга общей и дифференциальной осадки фундаментов, предназначена для долговременного контроля за поведением зданий
Датчики напряжений	Датчики нагрузки бетона Анкерные датчики	Мониторинг нагрузок в строительных конструкциях, мониторинг вертикальных или горизонтальных нагрузок на опорные элементы сооружения.
Гидравлические датчики нагрузки	Анкерные датчики электрогидравлические, тензометрические	Мониторинг подпорок, ж.б. колонн-надставок, анкерных стоек и стальных колонн-надставок
Измерители трещин и стыков	Одноосные и трехкомпонентные	Электронные измерители деформаций для мониторинга раскрытия трещин, открытых стыков в сооружениях, определения смещения отдельных элементов

На сегодняшний день в системы мониторинга строительных объектов внедряют электромеханические и электрические средства контроля и диагностики технического состояния конструкций, основанные на использовании чувствительных элементов, называемых первичными преобразователями, работа которых может быть основана на различных физических принципах. Такие средства мониторинга подразумевают периодическое или непрерывное наблюдение за состоянием конструкций, автоматизированную передачу, обработку и хранение полученной информации в электронном виде с дальнейшим ее накоплением в базе

данных ЭВМ. Системы таких устройств получили название информационно-измерительные средства (ИИС).

Основными преимуществами использования ИИС являются:

- возможность регистрации информации цифровыми накопителями и представления результатов измерений в цифровом виде;
- возможность обработки данных сотен приборов, хранение в памяти накопителя большого объема информации;
- возможность автоматизированного анализа полученных величин, установки порога тревоги, передачи информации на отдаленные центры, управляющие сетью приборов;
- отсутствие возможности накопления ошибок оператора при автоматизированных наблюдениях.

Тензометрические преобразователи – измерительные преобразователи деформации твердого тела, вызываемой механическими напряжениями, в электрический сигнал, предназначенный для последующей обработки. Бывают металлические (проволочные, фольговые, пленочные) и полупроводниковые (пластинчатые). С помощью тензорезисторов работа конструкции исследуется в области упругих деформаций. В основе принципа работы тензорезисторов лежит явление тензоэффекта, заключающееся в изменении электрического сопротивления проводящего материала при его механической деформации. Преобразование измеряемой деформации в изменение электрического сопротивления происходит в тензорезисторе вследствие наличия тензорезистивного эффекта в проводниковых и полупроводниковых материалах. Тензорезисторы позволяют обнаружить незаметные деформации в конструкциях, измерение которых позволяет получить значение механического напряжения от приложенной к объекту нагрузки. Тензорезисторы могут быть применены к конструкциям различных форм и из различных материалов для измерения различных типов напряжений, от статического до динамического. Тензорезисторы

используются как чувствительные элементы для датчиков силы, давления, ускорения, перемещения и крутящего момента.

Акустические пьезопреобразователи – чувствительные элементы со спектральным анализом сигналов от волн напряжений в конструкциях, находящихся под нагрузкой, основанные на измерениях ряда акустических параметров строительных материалов, соединенные в искусственную нейросеть. Установка таких систем возможна внутри конструкции при строительстве или на поверхности конструкции в период эксплуатации.

Волоконно-оптические датчики (ВОД) предназначены для контроля деформаций (перемещений) в элементах строительных конструкций. В основе действия лежит зависимость коэффициента отражения света в сенсорном элементе, жестко связанном с контролируемым объектом, от величины деформации этого объекта. ВОД, объединенные в единую систему контроля, могут быть также использованы для наблюдения за нагрузками, вибрациями, температурой, влажностью конструкций и др. Первые попытки создания датчиков на основе оптических волокон и публикации о разработках и экспериментальных образцах подобных датчиков относятся к середине 1970-х годов. Однако считается, что этот тип датчиков сформировался как одно из направлений техники только в начале 1980-х годов, в это же время появился термин "волоконно-оптические датчики" (optical fiber sensors).

Использование данного вида систем диагностирования строительных применяется специалистами научно-исследовательской лаборатории НИиППЛ «ПиК» МГСУ, ЗАО «Новые технологии», ЗАО «Мониторинг-центр» и др. Российские исследования систем мониторинга строительных объектов на базе волоконно-оптических датчиков, теоретические и практические аспекты их применения отражены в работах Егорова Ф.А., Неугодникова А.П., Рубцова И.В. и др.. Использование автоматизированных систем мониторинга на основе волоконно-оптических преобразователей является довольно затратным мероприятием в силу необходимости создания

стационарных сетей волоконно-оптических кабелей в пределах сооружения для передачи информации в централизованные пункты ее обработки, а также сложности систем трактовки и анализа получаемой информации. Также к недостаткам использования ВОД в рамках решения поставленной задачи можно отнести

- необходимость подготовки поверхности конструкции для установки датчиков (зачистка, наклейка датчиков и т.д.);
- сложность определения положения датчиков контроля по отношению к направлению действия максимальных напряжений и деформаций;
- невозможность оценки напряжений в глубинных слоях в случае их использования для эксплуатируемых конструкций;
- отсутствие единой метрологической базы для сертификации и поверки датчиков;
- неоднозначность требований и методического подхода к разрабатываемым средствам контроля;
- необходимость проведения экспериментальных исследований, построения градуировочных графиков на основе испытаний предварительно изготовленных образцов с целью накопления статистических данных;
- чувствительность к изменениям температуры и неуверенность в надежности результатов измерений при экстремальных условиях эксплуатации измерительных систем.

Молекулярно-электронные датчики – стационарные датчики пространственно-временного анализа. Позволяют с высокой точностью фиксировать качественно и количественно смещения, колебания, нормальную и тангенциальную деформацию, коррозионные изменения и т.д..

1.1.4. Динамические методы мониторинга технического состояния конструкций сооружений.

Динамические методы применяются для установления НДС конструкций при заданных динамических воздействиях, а также оценки схемы работы и состояния конструкций в режиме собственных и вынужденных колебаний. Динамические измерения основаны на сравнении волновых полей, и позволяют определять собственные частоты колебания конструкций и их изменения во времени с целью получения картины деформаций.

Методика динамического мониторинга НДС конструкций высотных зданий активно продвигается в настоящее время такими организациями как ГУП МНИИТЭП, ЦНИИЭП жилища и др., ее основные направления и технология реализации отражены в работах Гурьева В.В., Дорофеева В.М., Николаева С.В. и др.

В ГУП МНИИТЭП разработана технологии контроля периода и логарифмического декремента основного тона колебаний конструкций, а также методика динамического зондирования и ранней диагностики деформационного состояния конструкций, связанная с анализом передаточных функций для отдельных частей зданий и сооружений. Передаточная функция для части здания соответствует отношению компонентов спектров мощности сигналов, зарегистрированных в месте динамического воздействия и в месте приема отклика и характеризует НДС конструкций рассматриваемой части объекта. При динамических измерениях возможно выявление мест нарушения в конструктивных связях, наблюдение особенностей совместной работы здания с грунтовым основанием.

Анализ возможностей контроля несущей способности конструкций сооружений при неравномерных деформациях основания с использованием динамических методов позволяет к преимуществам их применения отнести практически полную автоматизацию процесса мониторинга, а к недостаткам:

- невозможность выявления причин и степени опасности происходящих процессов на основании изменения динамических параметров объектов;

- отсутствие точной фиксации мест изменения НДС в конструкциях.

1.1.5. Геодезические методы контроля технического состояния конструкций сооружений.

Нормативное техническое состояние конструкций зданий и сооружений в значительной степени определяется неизменностью и стабильностью их геометрических параметров (пространственное положение, пролеты конструкций, прогибы, перемещения и т.д.). Контроль деформаций проблемного сооружения традиционно осуществляется путем определения развития в основном вертикальных осадок по контуру сооружения в уровне основания с помощью геометрического нивелирования. Неравномерные деформации основания во многих случаях носят сложный пространственный характер, вызывающий, в свою очередь, пространственные деформации всего объекта. Конфигурация, пространственная жесткость сооружения, различные физико-механические характеристики материалов, наличие дефектов, повреждений несущих элементов и т.д. влияют на перераспределение деформаций по всему объему сооружения и, как следствие, возникает разброс значений перемещений в вертикальных и горизонтальных плоскостях, что необходимо учитывать для получения объективной картины изменения технического состояния конструкций. Учет только вертикальных осадок в уровне основания не отражает реальной картины пространственной деформации всего объекта и изменения НДС его конструкций. Это особенно важно при значительных габаритах объектов и большой этажности зданий, в условиях отсутствия доступа к части осадочных марок для проведения необходимого количества измерений при геометрическом нивелировании.

Таким образом, при неравномерных деформациях основания основными параметрами, которые должны контролироваться в ходе мониторинга, являются пространственные деформации сооружения -

взаимные перемещения массива его характерных точек в нескольких уровнях по высоте и периметру объекта, которые объект испытывает в результате деформационного воздействия со стороны основания.

Традиционно пространственные перемещения сооружений определяются при помощи геодезических измерений с применением целого ряда различных геодезических методов, относящихся к дистанционным оптическим способам получения информации о техническом состоянии конструкций объектов. Наиболее распространенным на сегодняшний день является определение деформаций зданий и сооружений с использованием современной геодезической аппаратуры – дальномеров, теодолитов, нивелиров и т.д.

Техническое развитие приборной базы привело к появлению качественно новых геодезических приборов: электронных тахеометров, являющихся сочетанием классического теодолита с лазерным дальномером и позволяющих одновременно выполнять линейные и угловые измерения до точек, снабженными специальными отражательными марками. Наличие электронной памяти и интерфейса в комплектации всех современных тахеометров и дальномеров позволяет накапливать и передавать зарегистрированную цифровую информацию в электронном виде в компьютер для последующей ее обработки с целью автоматизации процесса измерений.

В состав наблюдений за деформациями сооружений традиционно входит повторная планово-высотная съемка характерных точек с целью определения вертикальных и горизонтальных перемещений конструкций, кренов относительно точек прилегающей территории, а также мониторинг раскрытия трещин фасадов. Разности положения деформационных марок, полученные в результате каждого последующего цикла измерений, начиная с нулевого, позволяют судить о факте возникновения и динамики развития деформаций, скорости их изменения. К преимуществам применения традиционных геодезических методов в ходе мониторинге технического

состояния конструкций сооружений относится их регламентированность нормами.

К менее распространенным методам дистанционных измерений осадок, смещений, кренов зданий относят фотограмметрические методы, используемые для определения взаимного положения объектов по фотоснимкам. Соединение фотоснимков в единое целое выполняется с использованием математических законов соответствия между объектом фотографирования и его изображением на снимке. В рассматриваются особенности цифровых измерительных систем, методы и технические средства получения цифровых фотограмметрических изображений (цифровые камеры, фотограмметрические сканеры, цифровые фотограмметрические рабочие станции).

В зависимости от способов съемки и обработки снимков условно выделяется классическая фотограмметрия и стереофотограмметрическая съемка. Стереофотограмметрия позволяет производить необходимые измерения по стереопарам аналитическими (с использованием компьютеров), аналоговыми (с использованием стереофотограмметрических приборов) и цифровыми методами обработки изображений.

Также к нетрадиционным методам геодезического контроля геометрических характеристик сооружения относится *лазерное сканирование* - современный аналог фотограмметрического метода измерений. Результатом сканирования является трехмерная модель сооружения в виде множества (нескольких миллионов) точек, каждая из которых имеет свои координаты. На основе полученной 3-D модели сооружения возможно решение многочисленных инженерных задач, в том числе определение деформаций объекта съемки в течение длительного периода времени по направлениям всех пространственных координат, фиксация мест разрушений.

Преимуществом использования лазерного сканирования является:

- объективность съемки, наглядность результатов;
- универсальность метода, краткость полевого периода;

- высокая точность съемки;
- оперативное создание цифровых моделей;
- слежение за деформациями сооружений с оперативным отображением полученных данных в информационных системах.

К основным недостаткам можно отнести высокую стоимость оборудования и программного обеспечения.

Система контроля деформаций зданий с помощью *технологии GPS-измерений* предполагает установку в одной или нескольких контрольных точках в пределах здания стационарных антенн высокоточного GPS-приемника, регистрирующей непрерывно или с определенным интервалом свое пространственное положение с точностью до нескольких миллиметров и передающей текущие трехмерные координаты в компьютер. Смещения точек за опасный порог обозначенной области измерений вне зависимости от причин возникновения (просадка, смещение грунта, разрушение элементов конструкций здания, внешнее воздействие и т.д.) свидетельствует о факте деформации здания.

Стоит отметить, что применение технологии GPS-измерений для мониторинга деформаций объектов в районах с плотной городской застройкой ограничивается в связи с наличием многочисленных препятствия для приема спутниковых сигналов, вследствие чего затрудняется определение координат всех необходимых точек сооружения. При этом необходимо констатировать, что результатом GPS-измерений является достаточно небольшой объем информации, что при значительных габаритах объектов не дает полной деформационной картины сооружения.

Сделать объективный вывод о том, какие из перечисленных выше методов контроля следует применять в сочетании с традиционными методами обследования технического состояния достаточно сложно. Выявление их основных достоинств и недостатков не является окончательным критерием для принятия решения. В такой ситуации дополнительными факторами выбора являются:

- соответствие выбранного метода существующим нормам в области мониторинга и инструментальных измерений;
- универсальность метода, возможность его адаптации к конкретному объекту;
- условия эксплуатации объекта мониторинга, обеспечение доступа к несущим конструкциям;
- трудоемкость использования метода в ходе мониторинга;
- экономическая целесообразность применения метода;
- наличие в арсенале специалистов необходимой аппаратуры и опыта ее применения.

К преимуществам применения традиционных геодезических измерений (нивелирование, тахеометрическая съемка) можно отнести развитие современной геодезической приборной базы в сочетании с использованием передовых информационных технологий, опыт, накопленный в области наблюдений за деформациями зданий и сооружений, отраженный в научно-технической и нормативной литературе.

В связи с этим для решения поставленной задачи принята следующая схема проведения мониторинга технического состояния конструкций зданий и сооружений, подверженных влиянию неравномерных деформаций основания (рис. 1.3):

1. подготовительный этап мониторинга, в состав которого входит детальное обследование технического состояния конструкций сооружения и разработка схемы дальнейшего мониторинга;

2. этапы объектного и аналитического мониторинга, в состав которых входит периодическое выборочное обследование технического состояния конструкций, дополняющиеся традиционными геодезическими измерениями пространственных деформаций сооружения с последующим анализом и оценкой результатов мониторинга.

На сегодняшний день в России такой метод мониторинга является наиболее регламентированным.



Рис. 1. Схема мониторинга технического состояния конструкций зданий и сооружений при неравномерных деформациях основания.

Лекция 3

1.1. Анализ методов оценки влияния деформаций на техническое состояние конструкций сооружений.

1.1.1. Визуально-нормативная оценка.

При выбранной схеме мониторинга технического состояния конструкций сооружения проведение полного детального обследования является обязательным для нулевого, подготовительного этапа мониторинга. Данные детального обследования являются наиболее информативными и трудоемкими для сбора и обработки.

Обследование технического состояния конструкций начинается с подготовительного этапа, в течение которого проводятся мероприятия по подготовке исходных материалов и организации работы на объекте в соответствии с поставленными задачами и анализом возможных причин возникновения деформационного воздействия. В ходе данного этапа изучается имеющаяся в наличии проектная и техническая документация по обследуемому объекту.

В ходе предварительного обследования по результатам ознакомления с объектом мониторинга составляется программа производства работ по детальному обследованию, оценка их состава и объемов. В соответствие со спецификой эксплуатации объекта намечаются возможные места проведения вскрытий и отбора образцов, определяется необходимость проведения инженерно-геологических изысканий, устанавливаются места геологических выработок и т.д. На данном этапе проводятся мероприятия по предварительной оценке технического состояния конструкции объекта: выборочные геодезические измерения, контрольные обмеры, выявляются места повреждения конструкций и т.д.

Детальное обследование объекта или так называемый полевой период проведения работ состоит из комплекса производственных и инженерных

процедур по сбору на объекте исходной информации о его текущем техническом и эксплуатационном состоянии, геометрических параметрах, составе и физических характеристиках конструкционных материалов, наличии и расположении дефектов и повреждений, состоянии составе и свойствах грунтов основания и т.д.

По результатам подготовительного этапа мониторинга устанавливается категория технического состояния объекта, в соответствии с которой определяется схема и периодичность проведения последующих циклов мониторинга (рис. 1).

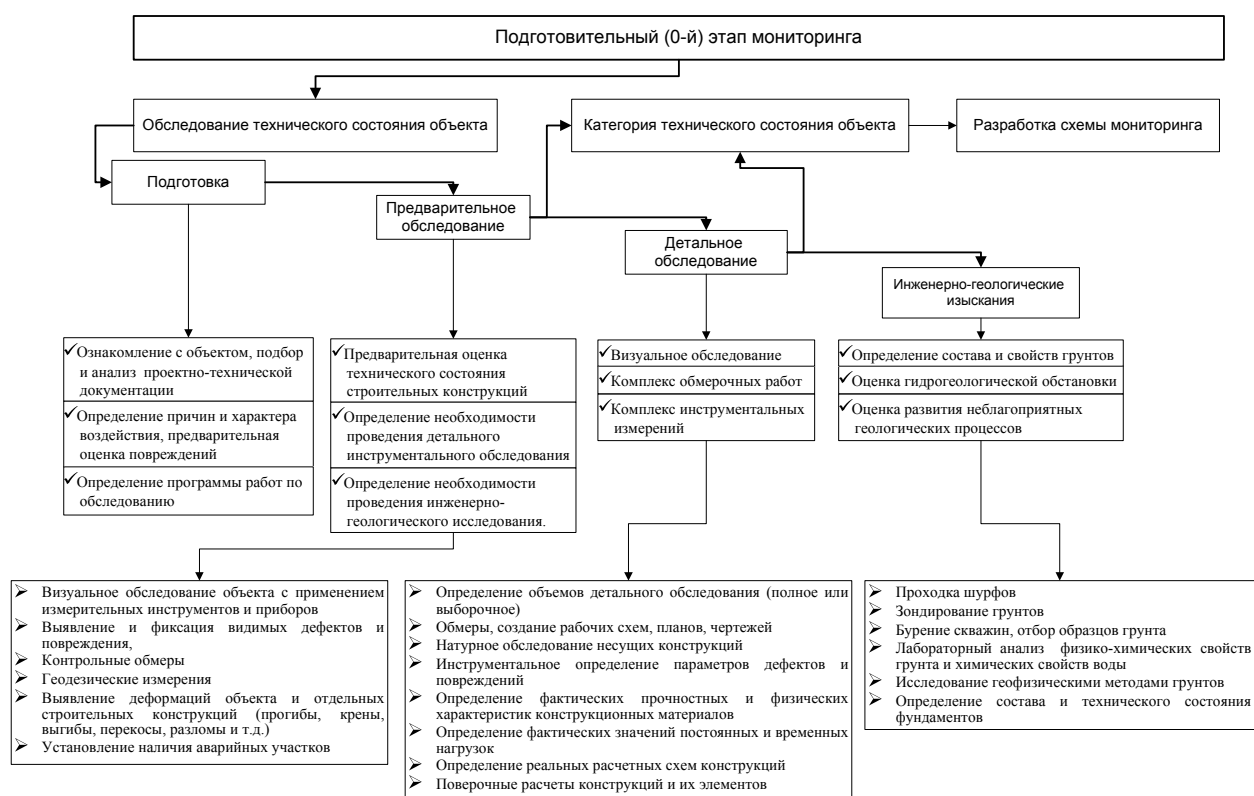


Рис. 1. Общая схема проведения работ по обследованию объекта на подготовительном этапе мониторинга.



Рис. 2. Общая схема проведения основных этапов мониторинга.

В ходе дальнейших циклов выборочного визуального и инструментального обследования сооружения, а также высокоточных геодезических наблюдений за пространственным положением конструкций объекта выявляются совместные деформации системы «основание-сооружение» (осадки фундаментов, смещения, крены, раскрытие трещин, повреждения, разрушения), происходящие за фиксированный промежуток времени между этапами мониторинга. На основании анализа данных мониторинга, полученных в ходе проведенных циклов, дается заключение о характере деформационного процесса (динамический рост, затухание, стабилизация и т.д.) (рис. 2).

По завершении каждого этапа мониторинга составляется заключение о техническом состоянии конструкций объекта на основании данных визуально-нормативной оценки и сравнения численных результатов измерений с их предельными значениями. К сложностям данного метода оценки технического состояния относится вероятность отсутствия видимых повреждений или сложность доступа к элементам несущего каркаса внутри сооружения, устройство отделочных покрытий, таких, например, как

подвесные потолки или фальш-полы, что характерно на сегодняшний день для большого числа административных и офисных зданий. В подобной ситуации важное значение приобретает оценка технического состояния конструкций на основе изменений глобальных деформационных параметров сооружения.

Нормативно-технические федеральные документы и документы Правительства Москвы (табл. 1) определяют предельно допустимые величины совместных деформаций оснований и сооружений, установленные исходя из конструктивных, технологических, архитектурных требований, условий прочности, устойчивости, трещиностойкости конструкций, при этом нормируются следующие значения проектных и дополнительных деформаций:

- максимальная (средняя) осадка сооружения (основания) \bar{s}_u ;
- относительная неравномерность осадок $(\Delta s/L)_u$;
- крен сооружения (фундамента) i_u ;
- кривизна изгибаемого участка сооружения (фундамента) p ;
- предельное горизонтальное перемещение сооружения f_u .

Таблица 1

Нормативно-технические документы, регламентирующие предельные деформации объектов			
	Нормативный документ	Нормируемые величины	Примечание
1	СНиП 2.02.01-83* «Основание зданий и сооружений»	Предельные проектные значения совместных деформаций основания и сооружения	Проектируемые, отдельно стоящие здания и сооружения
2	СНиП 2.01.07-85* «Нагрузки и воздействия»	Предельные проектные горизонтальные перемещения зданий	
3	МГСН 2.07-01 «Основания, фундаменты и подземные сооружения»	Предельные значения дополнительных	Существующие здания

4	«Рекомендаций по обследованию и мониторингу технического состояния эксплуатируемых зданий, расположенных вблизи нового строительства или реконструкции»	деформаций зданий	и сооружения, попадающие в зону влияния нового строительства или реконструкции
5	ВСН 490-87 «Проектирование и устройство свайных фундаментов и шпунтовых ограждений в условиях реконструкции промышленных предприятий и городской застройки»	Предельные допустимые деформации оснований фундаментов	строительства или реконструкции

В общем случае нормальная эксплуатация сооружения без снижения заданной долговечности обеспечивается при выполнении условия (1):

$$s \leq s_u, \quad (1)$$

где

- s - совместная деформация основания и сооружения;
- s_u - предельное значение совместной деформации основания и сооружения.

При этом необходимо отметить ограниченность возможностей в данном подходе. Очевидно, что использование значений предельных деформаций при оценке влияния неравномерных деформаций основания на конструкции существующего сооружения не может в полной мере отражать степень их опасности для несущей способности сооружений различных классов. Нормативные величины деформаций для проектируемого нового сооружения ограничивают значения его максимальной осадки или крена для всего жизненного цикла, в то время как величины деформаций, измеренные на определенных этапах мониторинга, являются дополнительными к осадкам, предшествующим определенной стадии эксплуатации сооружения. Эти зафиксированные значения могут являться частью проектных значений или превышать их.

Предельные допустимые значения дополнительных деформаций назначаются с учетом уровня ответственности объекта, его конструктивных особенностей, а также категории состояния конструкций на момент проведения обследования технического состояния, что, безусловно, является

более объективным подходом, отраженным в нормативных документах п.3-п.5 таблицы 1. Необходимо отметить, что при данном способе оценки возникает проблема ограниченности существующей классификации зданий и сооружений в зависимости от их конструктивных особенностей. В условиях современного строительства с учетом разнообразия применяемых конструктивных решений и используемых материалов существующей классификации недостаточно для объективной оценки состояния конструкций объекта.

Визуально-нормативная оценка технического состояния конструкций сооружения при неравномерных деформациях основания становится также недостаточной в случае необходимости получения полной картины изменения НДС конструкций и выявления степени опасности деформационного воздействия на них. Перераспределение внутренних усилий в элементах сооружения носит сложный характер, а ограниченная градация нормируемых показателей не отражает переходное состояние конструкций в период развития осадочного процесса. Такой подход неприемлем для оценки технического состояния конструкций сооружений, расположенных в сложных инженерно-геологических условиях крупных городов, где возрастает значение своевременного предупреждения возможных внезапных или постепенных отказов конструкций сооружений, возникновения аварийных ситуаций.

1.1.2. Численная оценка по результатам проверочных расчетов.

Для оценки изменения несущей способности конструкций в ходе мониторинга их технического состояния необходимо проведение проверочных расчетов их элементов с учетом изменчивости характера нагрузок и внешнего воздействия, геометрических характеристик конструкций и условий их работы, свойств грунтов и конструкционных материалов (прочностных, деформационных, теплофизических, структурных).

Расчет совместный работы системы «основание-сооружение» в соответствии с данными обследования технического состояния был бы наиболее полным и объективным решением. Однако даже с учетом интенсивного развития численных методов такая задача является затруднительной по причине невозможности в полном объеме промоделировать процессы деформации грунтов основания, которые в большинстве случаев носят сложный пространственный характер и не могут быть в полной мере выявлены в ходе обследования и инженерно-геологических изысканий. Моделирование взаимодействия сооружения с основанием является развивающимся направлением автоматизированного численного анализа работы конструкций, но недостаточно нормированным и внедренным в практику инженерных расчетов.

На сегодняшний день нормативными документами регламентируется отдельный расчет оснований и конструкций сооружений, причем в наиболее полной степени регламентированы расчеты несущих конструкций.

Расчеты по методу предельных состояний являются основой современного подхода к определению НДС всех строительных конструкций. Основным принцип расчетов по предельным состояниям можно сформулировать следующим образом: нагрузки, напряжения, перемещения, деформации, величины раскрытия трещин не должны превышать соответствующих им предельных значений, устанавливаемых нормами проектирования конструкций.

Предельные состояния подразделяются на две группы. Первая группа предельных состояний (I п.с.) характеризуется полной или частичной непригодностью к эксплуатации системы «основание-сооружение» или ее отдельных элементов. Контроль наступления I п.с. производится:

1. визуально или инструментально - в случае проявления видимых разрушений, изменений положения, потери устойчивости конструкций и др.;
2. расчетами по несущей способности конструкций с учетом данных обследования их технического состояния.

Вторая группа предельных состояний (II п.с.) характеризуется возникновением негативных факторов затрудняющих эксплуатацию системы «основание-сооружение» или ее отдельных элементов, а также снижающих заданную долговечность. Контролируется наступление II п.с.:

1. инструментально - в случае возможности измерения величин осадок, прогибов, кренов, углов поворота конструкций;
2. расчетом по деформациям конструкций на основе результатов обследования их технического состояния.

Условием обеспечения нормальной работоспособности конструкций объектов мониторинга и соответствия их технического состояния нормативным требованиям является отсутствие признаков наступления I и II предельных состояний, подтвержденное результатами инженерных расчетов и инструментальными измерениями.

Таким образом, наряду с периодическим обследованием и геодезическими измерениями важнейшим элементом системы мониторинга технического состояния конструкций зданий и сооружений, эксплуатируемых в условиях неравномерных деформаций грунтов основания, является численная оценка в ходе проверочных расчетов изменений НДС элементов конструкций по предельным состояниям, выполняемая на основании результатов инструментальных измерений, полученных в ходе мониторинга. Существующие на сегодняшний день методики проведения мониторинга далеко не всегда имеют в своей основе данный триединый подход.

1.2. Оценка НДС конструкций сооружений на основе численного анализа.

1.2.1. Ручной и автоматизированный численный анализ НДС конструкций сооружений.

В основе всех расчетов конструкций зданий и сооружений лежат методы строительной механики, теории упругости и пластичности, сопротивления

материалов. Основная цель проведения проверочных расчетов заключается в получении значений компонентов напряжений и деформаций в критических сечениях конструкций при действии заданных нагрузок с учетом геометрии элементов и прочностных характеристик материалов. Основные формулы численного анализа НДС конструкций сооружений по предельным состояниям I и II группы для различных видов материалов представлены на рисунке 3.

	РАСТЯЖЕНИЕ	СЖАТИЕ	ИЗГИБ	ВНЕЦЕНТРЕННОЕ РАСТЯЖЕНИЕ	ВНЕЦЕНТРЕННОЕ СЖАТИЕ
СТАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ СНиП II-23-81*	$N / A_n \leq R_y \gamma_c$	$N / A_n \leq R_y \gamma_c$ $N / \varphi A \leq R_y \gamma_c$	$M / W_{n,\min} \leq R_y \gamma_c$ $\tau = QS / J_t \leq R_y \gamma_c$ $f \leq [f]$	$\left(\frac{N}{A_n R_y \gamma_c} \right)^n + \frac{M_x}{c_x W_{x,\min} R_y \gamma_c} + \frac{M_y}{c_y W_{y,\min} R_y \gamma_c} \leq 1$ $\frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x}{J_{xn}} y \pm \frac{M_y}{J_{yn}} x \leq R_y \gamma_c$ $\frac{N}{\varphi_e A} \leq R_y \gamma_c$	
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ СНиП 2.03.01-84*	$N \leq R_s A_{s,tot}$		$M \leq R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A_s (h_0 - a')$ $Q \leq 0,3 \varphi_{wl} \varphi_{b1} R_b b h_0$ $f \leq [f]$	$Ne \leq R_s A_s (h_0 - a')$ $Ne' \leq R_s A_s (h_0 - a')$	$Ne \leq R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A_s (h_0 - a')$
БЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ СНиП 2.03.01-84*			$M \leq \alpha R_b W_{pl}$		$N \leq \alpha R_b A_b$
КАМЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ СНиП II-22-81*	$N \leq R_s A_n$	$N \leq m_g \varphi R A$	$M \leq R_b W$ $Q \leq R_b b z$		$N \leq m_g \varphi_1 R A_i \omega$
АРМОКАМЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ СНиП II-22-81*	$N \leq R_s A_s$	$N \leq m_g \varphi R_{sk} A$ $N \leq \varphi (0,85 m_g R A + R_{sc} A_s)$	$M \leq R_b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A_s (h_0 - a')$		$N \leq m_g \varphi_1 R_{ab} A_c \omega$ $S_c \leq 0,8 S_0$ $S_c \geq 0,8 S_0$
ДЕРЕВЯННЫЕ КОНСТРУКЦИИ СНиП II-25-80	$N / F_{HT} \leq R_p$	$N / F_{HT} \leq R_c$ $N / \varphi F_{расч} \leq R_c$	$M / W_{расч} \leq R_u$ $QS_{op} / J_{op} b_{расч} \leq R_{ск}$ $f \leq [f]$	$\frac{N}{F_{расч}} + \frac{MR_p}{W_{расч} R_u} \leq R_p$	$\frac{N}{F_{расч}} + \frac{M_{II}}{W_{расч}} \leq R_c$

Рис. 3. Параметры НДС конструкций в соответствии со СНиП, оцениваемые по результатам мониторинга.

Расчеты конструкций эксплуатируемых сооружений, производимые с целью оценки их технического состояния на основании данных инженерного обследования, должны отражать их реальную работу на текущем этапе эксплуатации – при объективной и достоверной оценке фактических условий, установленных в результате обследования, должны подтвердить результаты натурной диагностики (например, соответствие расчетного и фактического прогиба конструкции).

Практика проведения обследований технического состояния строительных объектов свидетельствует о том, что оценка их НДС во многих

случаях ограничивается ручными или автоматизированными расчетами основных конструктивных элементов сооружения (балок перекрытий, колонн каркаса, выборочных фрагментов наружных и внутренних стен, отдельных фундаментов) на прочность, жесткость и устойчивость. В действительности, такой подход применим лишь к весьма ограниченной области простейших практических задач и реализуется при незначительных объемах работ, характерных для сооружений, обладающих достаточно простой конфигурацией и конструктивной схемой. Для более сложных и масштабных сооружений обоснованное составление выводов и рекомендаций по общему НДС конструкций только на основании выборочных расчетов становится непростой задачей и во многом зависит от квалификации исполнителей. Полученные таким образом результаты могут существенно отличаться от реального НДС.

В связи с этим становится обязательным проведение полного перерасчета сооружения с помощью специализированных аналитических программных продуктов САПР, исследующих сложные системы с использованием численных математических методов. Подавляющее большинство таких компьютерных комплексов основывается на методе конечных элементов (МКЭ), который на сегодняшний день является наиболее широко распространенным на практике и динамично-развивающимся универсальным инженерным инструментом автоматизированного математического анализа НДС строительных конструкций от любого вида внешних воздействий, включая неравномерные осадки основания. Повсеместному внедрению МКЭ способствовали: общность подхода при решении различных задач расчета конструкций, естественная механическая трактовка и возможность построения моделей на основе физического, а не математического подхода, простота описания граничных условий и их учет при проведении расчетов, возможности рассмотрения неоднородных тел и т.д.

Интенсивное развитие, совершенствование и применение программных комплексов, реализующих МКЭ, обусловленное запросами бурно развивающихся областей науки и техники, необходимостью полной автоматизации всего расчетного процесса, а также стремительным развитием ЭВМ, привели к разработке в нашей стране и за рубежом ряда универсальных расчетных программных комплексов (МКЭ-систем), позволяющих устанавливать НДС конструкций с высокой степенью точности.

Вопросы автоматизации расчетов строительных конструкций активно развиваются в работах большой группы отечественных и зарубежных ученых, среди которых необходимо выделить Батэ. К., Вилсона Е., Варвака П.М., Городецкого А.С., Даркова А.В., Дашевского Е.М., Каракауса Р.П., Перельмутера А.В., Победрю Б.Е., Розина Л.А., Смирнова А.Ф., Шапошникова Н.Н., Адели Г., Гаевского Р., Зенкевича О., Миллера Г., Циммермана Т. и многих других.

1.2.2. Обзор современных программных комплексов расчета строительных конструкций.

Первые универсальные программные системы, реализующие МКЭ, были разработаны в 60-х годах: STRUDL-II, NONSAP, ASKA, NASTRAN, SESAM-69 и другие. С конца 70-х годов в СССР появилось множество программных комплексов – МИРАЖ, МОРЕ, КАСКАД-2, ПРОЧНОСТЬ-75, МКЭ/20, МАРС, ПАРСЕК, ЛИРА, СПРИНТ, FEA и т.д. В США и ряде европейских стран были разработаны программные комплексы, предназначенные для приближенного решения самых разнообразных задач не только из области механики деформируемого твердого тела, но и из таких областей как гидродинамика, акустика, электротехника и т.д. Наибольшее распространение из них получили: ABAQUS, ADINA, ANSYS, MARC, NASTRAN, EUFEMI, COSMOS, HERCULE, MODULEF, SAP-7, LS-DYNA и ряд других.

Современные программные комплексы численного исследования прочности, устойчивости конструкций, их автоматического конструирования, реализующие МКЭ (МКЭ-системы) являются мощным инструментом современного инженера в решении многочисленных задач и позволяют:

- производить расчет конструкций на статические и динамические нагрузки (сейсмические воздействия, пульсация ветра, вибрационные нагрузки) для широкого класса материалов с различными механическими характеристиками;
- производить расчет конструкций на статические нагрузки с учетом физической и геометрической нелинейности, температурных полей, взаимодействия с другими средами (например, с жидкостью);
- производить расчет критических нагрузок, при которых конструкция или ее элементы теряют устойчивость, поведения конструкции после потери устойчивости;
- учитывать свойства материала (анизотропность, нелинейная упругость, пластичность, текучесть) и т.д.

Высокие темпы и сложность строительства, осуществляемого в крупных городах РФ, требуют сегодня обязательного применения МКЭ-систем не только на этапе проектирования сооружений, но и в ходе различных этапов его строительства и эксплуатации. В последнее время все чаще с помощью численного моделирования также осуществляется контроль технического состояния конструкций сооружений, расположенных в зоне влияния нового строительства.

К современным МКЭ-системам предъявляются высокие требования к точности и надежности расчетов. Наиболее распространенными МКЭ-системами на сегодняшний день в России являются:

- ЛИРА, SCAD – Украина;
- Stark_ES, MicroFe, СТАДИО – Россия;
- ANSYS, NASTRAN, Cosmos, CadFem – США;

- Robot Milleniun – Франция.

Основные различия отечественных и зарубежных программных комплексов заключаются в ориентировании на соответствие различным строительным нормам (нормы РФ, Еврокод и т.д.), стоимости программного продукта, степени сложности работы с ним, наличия дополнительных опций, предоставляемых производителями программных средств.

Можно выделить следующие общие характерные черты, отличающие современные МКЭ-системы:

- развитая графическая среда;
- многообразие инструментов для формирования расчетной схемы с учетом всех особенностей работы конструкции;
- возможность моделирования сложных расчетных схем, путем их сборки из более простых;
- мощный многофункциональный процессор, обеспечивающий решение задач большой размерности;
- развитая библиотека конечных элементов: стержневые плоские и пространственные схемы, плиты, балки-стенки, оболочки, массивные конструкции, мембраны, тенты, вантовые конструкции, а также комбинированные системы;
- импорт плоской и пространственной геометрии объектов из систем ArchiCAD, AutoCAD и др., дальнейшее преобразование в конечно-элементные модели (чтение данных в форматах DXF, DWG и др.)
- наглядность результатов расчетов, графическое и табличное представление, цифровая и цветовая идентификация значений усилий, перемещений, полей напряжений и др.

Инженер, проектировщик, специалист в области расчета строительных конструкций имеет сегодня большие возможности самостоятельного выбора программного продукта, который наиболее всего соответствует его запросам,

целям и возможностям. Выбор программы зависит от типа решаемой задачи, размерности задачи и таких факторов, как:

- распространенность и востребованность расчетного комплекса;
- доступность данного лицензированного продукта на российском рынке;
- достаточная документированность;
- ориентирование на российские нормы проектирования и расчета;
- коммерческая стоимость.

1.2.3. Роль МКЭ-моделирования в системе мониторинга технического состояния конструкции сооружений.

МКЭ-системы являются на сегодняшний день общедоступными средствами численного моделирования и прогнозирования работы сооружений, в связи с чем становится возможным использовать МКЭ-моделирование в качестве одного из основных элементов в системе периодического мониторинга технического состояния строительных конструкций.

Возможности современных МКЭ-систем позволяют помимо высокой степени точности моделирования работы конструкций вносить любые изменения, характеризующие реальные условия эксплуатации объекта, т.е. производить актуализацию МКЭ-модели сооружения в ходе его мониторинга (рис. 1.7).

Таким образом, оценка технического состояния конструкций производится по результатам анализа:

- натуральных наблюдений;
- геодезических измерений пространственных деформаций;
- критериев визуально-нормативной оценки;
- результатов МКЭ-расчета сооружения;
- критериев оценки I и II предельного состояния конструкций.



Рис. 4. МКЭ-моделирование в системе мониторинга.

МКЭ-моделирование позволяет получать общую картину НДС конструкций всего сооружения при деформационном воздействии. На основании оценки перемещений, напряжений, усилий в элементах конструкций, анализа соответствия их расчетной прочности, жесткости, устойчивости нормативным требованиям, производится разработка рекомендаций по дальнейшей эксплуатации конструкций объекта мониторинга, при необходимости выявляются наиболее нагруженные элементы с целью дальнейшей установки дополнительных измерительных приборов.

Наиболее эффективно данная методика может применяться для зданий и сооружений, возведенных в последнее десятилетие, период, связанный с повсеместным внедрением в практику проектирования обязательного МКЭ-моделирования, в результате чего данные сооружения уже имеют МКЭ-модели, использованные в ходе проектирования. К таким объектам относятся каркасные, сборные или монолитные, железобетонные и металлические сооружения, жилые и общественные здания любого назначения. Их МКЭ-

модели для целей мониторинга могут быть предоставлены соответствующими проектными организациями.

Для большинства ранее возведенных объектов МКЭ-модели являются недоступными для организаций, выполняющих мониторинг, в силу различного рода обстоятельств:

- отсутствие или недоступность МКЭ-модели;
- использование устаревших МКЭ-систем;
- сложность конвертирования МКЭ-модели в другие современные МКЭ-системы.

Таким образом, на подготовительном этапе мониторинга во многих случаях возникает необходимость создания новой МКЭ-модели объекта. При значительных габаритах и сложных конструктивных схемах сооружений такая работа требует дополнительных временных затрат, что должно быть учтено при планировании работ по мониторингу.

Лекция 4

Геодезический мониторинг изменения геометрических параметров сооружений.

1. Цель и задачи геодезического мониторинга.

Зависимость эксплуатационных характеристик зданий от степени нарушения геометрии сооружения. «МГСН 2.07-01. Дополнение пособия Основания, фундаменты и подземные сооружения. Обследования и мониторинг при строительстве и реконструкции зданий и подземных сооружений. Таблица 1,2»

Влияние осадочных процессов на изменение несущей способности конструкции. «МГСН 2.07-01. Дополнение пособия Основания, фундаменты и подземные сооружения. Обследования и мониторинг при строительстве и реконструкции зданий и подземных сооружений. Таблица 1,2»

Связь между категорией состояния конструкции и величинами допустимых осадок и деформаций. «1. СНиП 3.03.01-84 Геодезические работы в строительстве 2. МГСН 2.07-01. Дополнение пособия Основания, фундаменты и подземные сооружения. Обследования и мониторинг при строительстве и реконструкции зданий и подземных сооружений. Приложение 3,4,5»

Зависимость между величинами ожидаемых осадок и деформаций и точностью их измерений.

Точность измерений и вероятность обнаружения происходящих сдвигов и осадок.

Методы измерений вертикальных смещений элементов конструкций. «ГОСТ 24846-81 Грунты. Методы измерения деформаций зданий и сооружений»

Методы измерений горизонтальных смещений элементов конструкций. «ГОСТ 24846-81 Грунты. Методы измерения деформаций зданий и сооружений»

Нормативно – методические рекомендации по методам измерений и деформаций.

Методы измерения крена сооружений. «1. «ГОСТ 24846-81 Грунты. Методы измерения деформаций зданий и сооружений» 2. Измерения отклонений строительных колонн от вертикали электронным тахеометром»

2. Специфика производства геодезических измерений для мониторинга деформаций. «МГСН 2.07-01. Дополнение пособия Основания, фундаменты и подземные сооружения. Обследования и мониторинг при строительстве и реконструкции зданий и подземных сооружений.»

Расположение деформационных марок на зданиях и сооружениях.

Расчет периодичности наблюдений.

Контроль стабильности реперов геодезической основы.

Лекция 5

Геодезический мониторинг изменения геометрических параметров сооружений.

1. Деформационные Характеристики и предельные погрешности их определений. «МГСН 2.07-01. Дополнение пособия Основания, фундаменты и подземные сооружения. Обследования и мониторинг при строительстве и реконструкции зданий и подземных сооружений. П. 2.2»
2. Отчетные документы по мониторингу осадок. «МГСН 2.07-01. Дополнение пособия Основания, фундаменты и подземные сооружения. Обследования и мониторинг при строительстве и реконструкции зданий и подземных сооружений.»
 - 2.1 Ведомость контроля стабильности реперов.
 - 2.2 Заключение о стабильности реперов.
 - 2.3 Сводная ведомость осадок.
 - 2.4 Заключение о состоянии конструкции здания.

Лекция 6

1.1. Пространственно-координатная съемка деформаций объектов мониторинга.

Деформации основания, как и спровоцированные ими деформации сооружения, во многих случаях носят пространственный характер. Тем не менее, зачастую при проведении работ по геодезическому мониторингу измерения горизонтальных смещений и кренов сооружения не производятся вообще, что, безусловно, сказывается на качестве выводов технического заключения о влиянии деформаций на техническое состояние конструкций сооружений и прогнозе их дальнейшего развития. Это приводит к ошибкам в составлении рекомендаций по проведению соответствующих мероприятий, предупреждающих негативные последствия критических деформаций.

При сложном характере деформации основания становится необходимым осуществлять геодезические измерения пространственных перемещений массива характерных точек в нескольких уровнях по высоте и периметру объекта. Реализация поставленной задачи становится трудоемкой, если применять только традиционные методы измерений.

На сегодняшний день наиболее эффективным способом решения является пространственно-координатная (ПК) съемка положения объекта современными электронными геодезическим приборами – тахеометрами, совмещающими в себе функции кодового теодолита, светодальномера и мини-компьютера. Такие приборы широко распространены в современном строительном производстве и представлены многими зарубежными фирмами производителями, такими как Sokkia (Япония), Trimble Navigation (США), Leica Geosystems (Швейцария), Topcon Positioning Systems (Япония), Nikon (Япония), Pentax (Япония) и т.д., а также отечественным предприятием УОМЗ (Уральский оптико-механический завод).

Тахеометрическая съемка сооружения (ПК-съемка) (рис 1) предполагает определение планово-высотного (пространственного) положения массива замаркированных точек на определенном этапе мониторинга. Это позволяет по разности значений пространственных координат (x_i, y_i, z_i) соответствующих точек в разных циклах измерений одновременно вычислять как вертикальные, так и горизонтальные перемещения объекта, крен, а также другие деформационные характеристики.

С целью систематизация массива точек, перемещения которых являются, по сути, предметом, геодезического мониторинга, вводится понятие пространственно-координатной модели (ПК-модели) контроля деформаций сооружения.

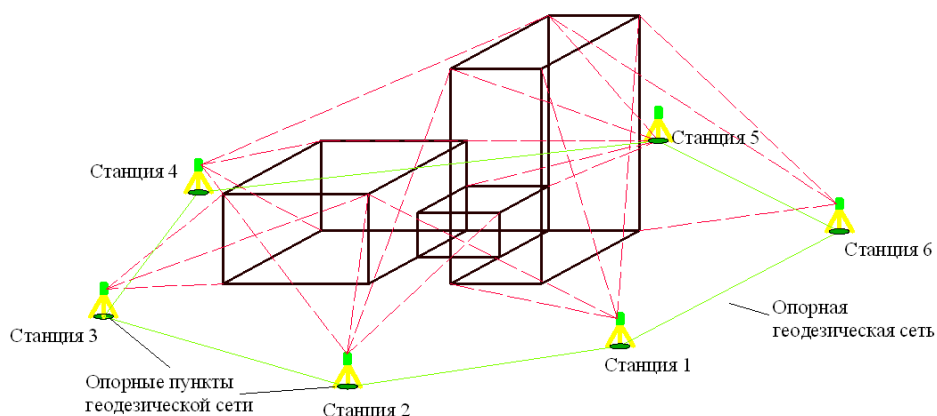


Рис. 1. ПК-съемка объекта мониторинга.

В зависимости от размера сооружения и его конструктивной схемы ПК-модель может формироваться только по форме внешнего контура объекта, т.е. состоять из внешних контролируемых точек (узлов), фиксированных на фасадах. В случае значительных габаритов или при сложной конструктивной схеме объекта для повышения точности измерений и возможности дополнительного контроля деформаций ПК-модель должна содержать контролируемые узлы внутри объекта (рис. 2). Осадки данных узлов определяются путем геометрического нивелирования внутри сооружения, при этом использование цифровых нивелиров значительно

повышает темпы работ. Внешние контролируемые узлы, расположенные в уровне основания сооружения, могут дублироваться с помощью стандартных осадочных марок, расположенных как внутри, так и снаружи объекта.

Аналитическая часть мониторинга строится на использовании МКЭ-моделей для оценки НДС конструкций сооружения. В связи с этим основной целью построения ПК-модели, помимо наглядного и достоверного представления пространственных деформаций в объеме всего сооружения, является использование результатов геодезических измерений при проверочных расчетах сооружения путем дополнения МКЭ-модели данными мониторинга, полученными с использованием ПК-модели. По этой причине необходимо, чтобы узлы ПК-модели сооружения с возможно большей точностью соответствовали узлам (или части узлов) МКЭ-модели.

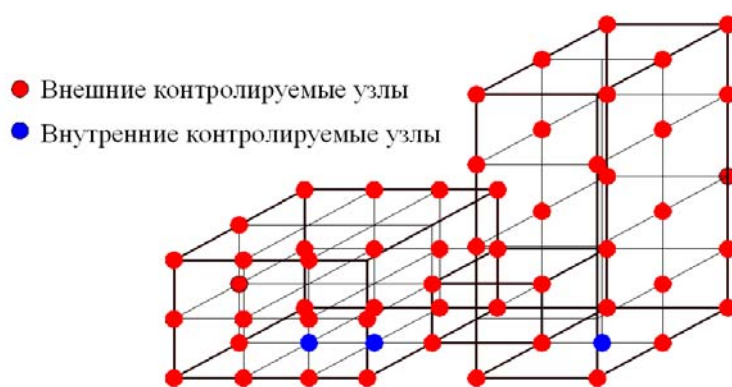


Рис. 2. Внешние и внутренние контролируемые узлы ПК-модели контроля деформаций сооружения.

Формирование ПК-моделей объектов мониторинга связано с решением нескольких основных вопросов:

- определение критериев выбора контролируемых узлов ПК-модели;
- определение требований к формированию планово-высотной геодезической основы;
- решение проблемы стесненного доступа к объекту мониторинга;
- определение требований к точности измерений для создания ПК-модели;
- математическая обработка результатов измерений.

1.2. Общие принципы построения ПК-моделей контроля деформаций объектов мониторинга.

1.2.1. Выбор контролируемых узлов ПК-модели.

ПК-модель является структурированным массивом взаимосвязанных точек (узлов), отражающим основные геометрические особенности объекта мониторинга с учетом особенностей его конструктивной схемы. Формирование ПК-модели осуществляется в несколько этапов. Сбор необходимой информации производится на подготовительном этапе мониторинга в ходе проведения комплексного инженерного обследования технического состояния конструкций сооружения.

1-ый этап. На начальном этапе, в случае наличия проектной документации, выявление основных особенностей сооружения может производиться без доступа к объекту мониторинга. При этом по архитектурным чертежам (планам, фасадам, разрезам) фиксируются такие характеристики объекта, как:

- габариты;
- конфигурация в плане;
- этажность;
- расположение основных осей.

При детальном ознакомлении с данными конструктивных чертежей основное внимание уделяется:

- схемам расположения несущих конструкций;
- пространственной жесткости сооружения;
- типу фундаментов.

Дополнительно при составлении проекта размещения деформационных марок в характерных точках сооружения необходимы сведения об инженерно-геологических и гидрогеологических условиях площади застройки, в соответствии с чем в дальнейшем определяются:

- допустимые абсолютные величины осадок;

- проектная предварительно допустимая неравномерность осадок.

В общем случае для объектов, различающихся назначением, габаритами, конструктивной схемой и т.д., контролируемые узлы ПК-модели размещаются:

- в узлах каркаса;
- в местах пересечения несущих продольных и поперечных стен;
- в зонах расположения деформационных швов;
- в местах сопряжения отдельных частей сооружения и т.д.

Таким образом, внешние контролируемые узлы должны располагаться в обязательном порядке по углам и периметру наружных стен в соответствии с шагом осей сооружения и соответствовать уровням перекрытий этажей (фундамента-первого этажа, далее выбранных перекрытий), находиться в местах резких перепадов высот, в местах примыкания кровли и т.д.

Количество контролируемых узлов должно быть достаточным для определения пространственной деформации объекта мониторинга и выявления неравномерности осадочного процесса. При этом необходимо учитывать экономическую целесообразность и сложность измерения большого количества точек, снижение точности геодезических измерений, которое напрямую зависит от количества станций съемки (положений прибора). Также необходимо отметить, что для получения максимально достоверных данных время выполнения одного цикла измерений должно гарантировать стабильность состояния объекта. В завершении данного этапа намечаются места предварительного расположения контролируемых узлов ПК-модели.

2-ой этап. После предварительного выбора узлов ПК-модели производится коррекция их числа и положения на месте в ходе визуального изучения объекта мониторинга с учетом:

- условий окружающей застройки;
- особенностей эксплуатации сооружения.

В условиях плотной застройки близлежащей территории требуется:

- определить степень доступа к намеченным положениям узлов ПК-модели объекта мониторинга;
- определить возможность снижения количества контролируемых точек при отсутствии доступа для их съемки.

К важным аспектам визуального ознакомления можно отнести внимательное изучение конструкции внешней облицовки сооружения с целью выбора типа осадочных и деформационных марок.

Месторасположение и количество внутренних узлов ПК-модели может меняться в зависимости от условий доступа к поверхностям несущих конструкций, расположенных внутри сооружения.

3-ий этап. На данном этапе производится анализ соответствия имеющейся МКЭ-модели объекта мониторинга и его ПК-модели. В случае необходимости в схемы расположения контролируемых узлов вносятся дополнительные изменения.

4-ий этап. Фиксация положения контролируемых узлов на сооружении осуществляется с помощью деформационных марок. При этом, по возможности, необходимо соблюдать требование к вертикальности створов и горизонтальности уровней установки марок. Далее на детальных схемах фасадов фиксируются окончательное местоположение наружных деформационных марок. На поэтажных планах наносятся места расположения внутренних осадочных марок для высотного контроля положения несущих конструкций. Каждой марке присваивается номер, соответствующий ее положению, под которым в дальнейшем фиксируются все наблюдения, относящиеся к данной марке.

1.2.2. Требования к построению опорной геодезической сети.

Следующим важным этапом построения ПК-моделей объектов мониторинга является построение опорной геодезической сети (ОГС), которая представляет собой систему выбранных и закрепленных на

местности точек, служащих опорными пунктами геодезической съемки.

Общие требования к точкам ОГС можно представить в следующем виде:

- расположение вне зоны влияния деформационных процессов или наличие контрольных ориентирных точек за пределами данной зоны;
- отсутствие влияния различного рода вибрационных процессов и возможности разрушения точки;
- постоянный контроль стабильности положения точки.

Планово-высотная сеть для тахеометрической съемки внешних контролируемых узлов объектов создается методом полигонометрии, наиболее часто применяемом в городских условиях, и включает в себя станции, расположенные на точках ОГС, в количестве, достаточном для фиксации положения всех замаркированных точек объекта. При этом допускается наличие «висячих» станций. Для определения величин перемещений контролируемых узлов ПК-модели за пределами деформационной зоны закладывают 3-4 опорных знака. Об их стабильности судят по сходимости значений их координат и высот в начальном и текущем цикле.

Форма ОГС определяется территорией застройки, формой и площадью объекта мониторинга и доступом к нему [60]. В зависимости от этого сеть проектируется в виде системы одиночных ходов с узловыми точками. Съемка сооружения осуществляется в условной (местной) системе координат. Наиболее выгодное расположение осей такой системы достигается при совмещении их направления с продольными и поперечными осями сооружения, что позволяет без промежуточных вычислений определять перемещения узлов ПК-модели вдоль данных осей.

Высотная сеть, создаваемая с целью определения вертикальных составляющих осадок внутренних контролируемых узлов, формируется методом геометрического нивелирования и включает опорные реперы, высотное положение которых остается практически неизменным. Тип репера устанавливается в зависимости от грунтовых условий площадки:

- глубинные реперы, основания которых закладываются в скальные, полускальные или другие коренные практически несжимаемые грунты;
- грунтовые реперы, основания которых закладываются ниже глубины сезонного промерзания или перемещения грунта;
- стеновые реперы, устанавливаемые на несущих конструкциях прилегающих зданий и сооружений, осадка фундаментов которых практически стабилизировалась.

Высотная ОГС прокладывается в виде одиночных ходов или систем ходов между опорными реперами, которые закладываются не позднее, чем за 2 месяца до начала наблюдений за деформациями сооружения. Требования к опорным реперам высотного нивелирования:

- расположение вне зоны влияния деформационных процессов на расстоянии, не менее тройной толщины слоя проседающего грунта, или в зависимости от метода крепления котлована при осуществлении строительства на прилегающей к объекту мониторинга территории;
- наличие не менее 3-х контрольных реперов;
- возможность контроля стабильности опорных реперов для каждого цикла наблюдений.

Нивелировка внутренних осадочных марок должна производиться в единой системе высот с внешними деформационными марками для упрощения дальнейшего процесса обработки информации. Конструкция и точное расположение пунктов ОГС разрабатывается непосредственно организацией, производящей измерения, при согласовании и по утвержденному плану с соответствующими эксплуатирующими и коммунальными организациями.

1.2.3. Технология изготовления и установки деформационных и осадочных марок.

В общем случае деформационные и осадочные марки - это геодезические знаки, жестко укрепляемые на конструкциях сооружения,

таких как стены, колонны, балки, перекрытия, фундаменты и т.д., которые меняют свое пространственное положение вследствие неравномерности осадок основания и дальнейшего перераспределения деформаций в объеме всего сооружения.

Внешние деформационные марки. При измерениях пространственных составляющих перемещений элементов строительных конструкций с использованием электронных тахеометров на заранее выбранные точки (узлы ПК-модели) устанавливают световозвращающие деформационные марки в виде самоклеющихся отражателей, которые надёжно крепятся к любым ровным и чистым поверхностям. Отражатели представляют собой плоские самоклеющиеся пленки (рис. 3а), на внешнюю поверхность которых нанесен катафотный слой в виде микропризм или стеклянных шариков диаметром от 0,05 до 0,3мм. Пленки изготавливаются различных размеров, преимущественно прямоугольной формы, имеют фиксированную точку наведения.

Применение самоклеющихся отражателей позволяет сэкономить трудозатраты вследствие отсутствия необходимости в сверлении отверстий в стенах и установке дюбелей. Отражатели способны выдерживать сезонные климатические воздействия.

Осадочные марки для геометрического нивелирования. Более жесткие требования предъявляются к осадочным маркам, устраиваемым в местах расположения внутренних контролируемых узлов, которые служат для установки или подвески нивелирных реек. В данном случае их конструкции должны обеспечивать долговременную сохранность, устойчивость, точность фиксирования положения рейки, обеспечивать наиболее благоприятные условия производства нивелирных работ.

В соответствии с местами установки осадочные марки делятся на стенные (на вертикальных гранях конструкций), плитные (на горизонтальных плоскостях) и марки-конструкции (отдельные детали сооружения, используемые в качестве марок). Стенные наружные осадочные марки в основном устанавливаются на расстоянии 0,4 - 0,8м от уровня отмостки.

Марки внутри помещений закладываются на удобной для съемки высоте с учетом возможности доступа к конструкциям сооружения.

Традиционно осадочные марки в зависимости от способа устройства и закрепления выполняются:

- закладываемыми в тело железобетонных и бетонных конструкций, в наружные и внутренние кирпичные (блочные) стены и столбы;
- поверхностными, устанавливаемыми на стальные закладные полосы или на стальные колонны;
- закрытыми (в местах подверженных механическим повреждениям);
- потайными, шкаловыми и т.д.

В ходе мониторинга для нивелировки внутренних контролируемых узлов применяются поверхностные осадочные марки, устанавливаемые на несущие балки перекрытий и защищенные от механических повреждений конструкциями внутренней отделки помещений (подвесные потолки). С целью получения достоверных результатов внешние осадочные марки для объектов с вентилируемыми фасадами и наружной теплоизоляцией, что характерно для большого количества возводимых в настоящее время зданий различного назначения, устраиваются закладываемыми в тело несущих конструкций в виде анкеров. В данные анкера в момент измерений ввинчиваются металлические штанги, являющиеся опорой для постановки рейки (рис. 3б). Для обеспечения сохранности марок в течение всего периода мониторинга они были выполняются съемными.

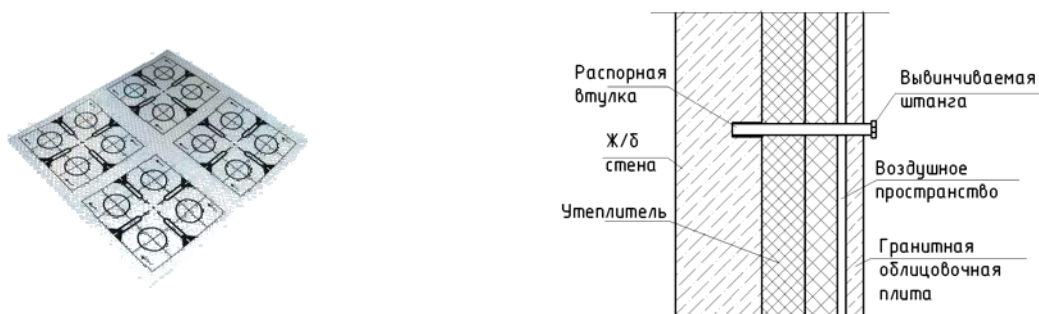


Рис. 3. Деформационные и осадочные марки.
а) Плоские самоклеящиеся деформационные марки.
б) Устройство стеновой осадочной марки.

1.3. Использование усовершенствованных методов измерений координат в условиях стесненного доступа.

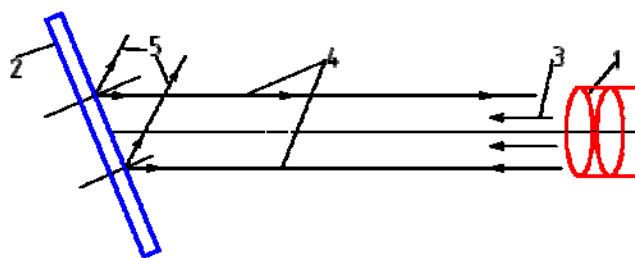
1.3.1. ПК-съёмка в условиях стесненного доступа.

Проблема проведения геодезических измерений с целью выявления влияния неравномерных деформационных процессов на техническое состояние конструкций строительных объектов наиболее остро стоит для крупных городов, характерными чертами которых являются плотная застройка центральных районов, высотные здания, узкие улицы, проезды, переулки, наличие автомагистралей с непрерывным движением транспортного потока, закрытых охраняемых территорий. Все это затрудняет проведение геодезических работ и существенно снижает производительность труда.

Проведение тахеометрической съёмки связано с прокладыванием полигонометрических ходов, а также измерением большого количества точек, что требует благоприятных условий видимости. В некоторых случаях приходится прибегать к установке опорных станций на перекрытиях или покрытии расположенных вблизи объекта мониторинга устойчивых зданиях или производить дополнительные контрольные измерения.

Основная проблема производства измерений заключается в обеспечении самоклеящимися плоскими световозвращающими марками обратного возвращения светового потока лазерного дальномера тахеометра при критических углах падения луча до 30° - 35° к плоскости катафотного слоя марки. При производстве измерений в стесненных условиях городской застройки часто фактические углы измерений оказываются ниже указанных критических значений углов падения излучения дальномера на деформационные марки, вследствие чего в ряде точек теряется возможность проведения точных дальномерных измерений (рис. 4).

Рис. 4. Характер отражения плоской катафотной марки.



1 – объектив лазерного дальномера; 2 – плоская катафотная пленка; 3 – лазерное излучение дальномера; 4 – возвращенное излучение дальномера; 5 – отраженное излучение дальномера.

Поскольку фотоприемник светодальномера срабатывает на определенном минимуме интенсивности светового излучения, а освещенность внутри пятна сфокусированного электромагнитного потока убывает от центра к краям, при отражении от плоской поверхности на ней возникают две зоны (ближняя и дальняя), имеющие минимальный порог интенсивности. Удаление этих зон от светодальномера зависит от размера луча, размера световозвращающей марки и угла падения луча (рис. 5). При этом возникает неопределенность точки срабатывания фотоприемника, что снижает точность измерений вследствие большой дисперсии в показаниях дальномера.

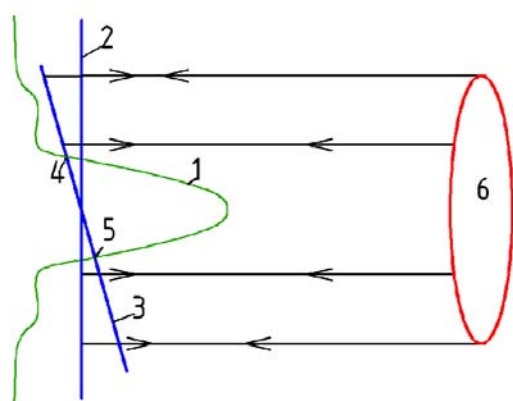


Рис. 5. Кривая распределения освещенности в пятне рассеивания.

1 – кривая распределения освещенности в пятне рассеивания; 2 – нормальный экран; 3 – косой экран; 4,5 – ближняя и дальняя зона срабатывания фотоприемника; 6 – объектив светодальномера.

1.3.2. Сферические отражатели для измерения пространственных координат.

Проведение полноценной тахеометрической съемки пространственного положения объектов становится возможным в результате создания специализированной технологии координатных измерений в условиях

стесненного доступа. В ее основе лежит использование специально разработанных сферических отражательных марок, позволяющих проводить устойчивые измерения координат при любых углах визирования с заданной точностью в большом диапазоне расстояний. При наведении на такие марки автоматически обеспечивается нормальное падение луча к сферической поверхности в точке наведения и продолжение его продолжения через центр сферы с любой точки стояния тахеометра, что исключает эффект косоугольного визирования и позволяет наблюдать расположенные на фасаде здания марки с любого направления без снижения точности наведения.

Сферическая световозвращающая марка (рис. 6) представляет собой сферу радиусом 20 мм, обклеенную 12 пентагональными и 20 гексагональными поверхностями, изготовленными из световозвращающей катафотной ткани.

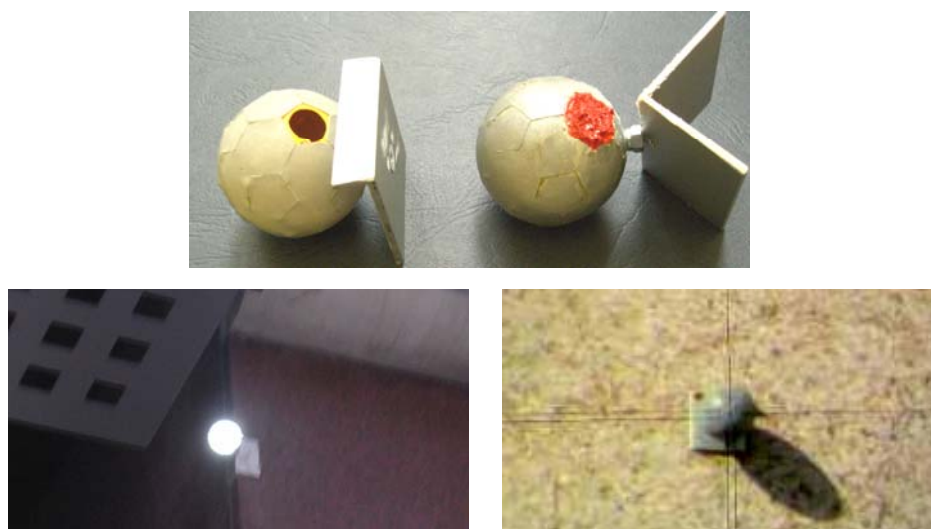


Рис. 6. Сферические световозвращающие марки.

Характер световозвращения при проведении дальномерных измерений показан на рисунке 7. Точка необходимого минимума световозвращения находится на одинаковом расстоянии от светодальномера, что исключает неоднозначность измерений расстояний, однако их расположение относительно центра сферы теоретически может меняться в зависимости от характера распределения интенсивности излучения в конкретном светодальномере. Возникающая при этом константа измерений (расстояние

до центра сферы) должна определяться экспериментально для используемого светодальномера и данного диаметра сферы.

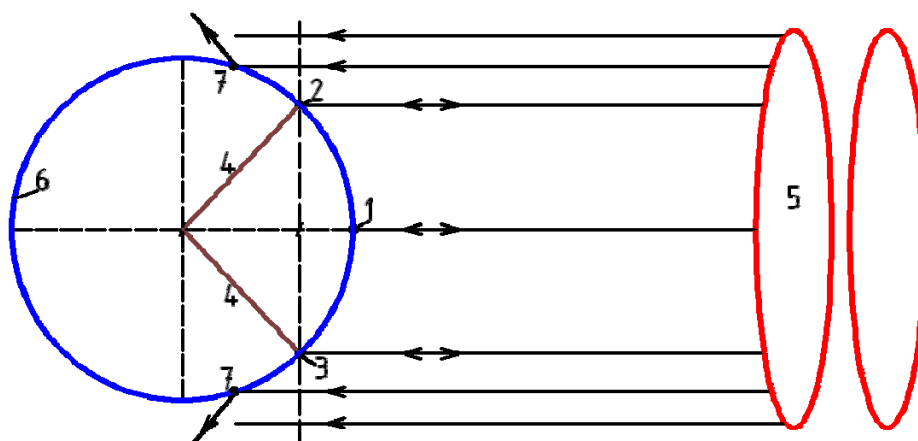


Рис. 7. Характер отражения сферической световозвращающей марки.

1 – точка наведения; 2,3 – точка минимума световозвращения катафотной сферической поверхности; 4 – константа световозвращающей сферической марки; 5 – объектив светодальномера; 6 – сфера со световозвращающим катафотным покрытием; 7 – точка критического угла падения для катафотной сферической поверхности.

Константы используемых сферических марок были определены с помощью тахеометра с видимым излучением Trimble3605R и тахеометра с инфракрасным излучением Sokkia4110R и составили соответственно величины 19-20мм, что для данных марок ($d=40\text{мм}$), составляет величину, равную половине его диаметра.

Применение технологии ПК-съемки в условиях стесненного доступа с помощью сферических световозвращающих деформационных марок позволяет по сравнению с традиционной технологией, основанной на использовании стандартных плоских марок:

- снизить трудоемкость измерений за счет отсутствия станций съемки, расположенных в местах осложненного доступа (крыши прилегающих строений, проезжие части, частные территорий и т.д.);
- обеспечить получение более полной картины пространственных перемещений характерных точек сооружения за счет увеличения количества внешних узлов ПК-модели, расположенных в верхних контролируемых горизонтальных уровнях.

1.4. Мониторинг деформаций контролируемых узлов ПК-модели.

Для решения поставленной задачи применяется координатный метод определения перемещений. Деформации ПК-модели объекта мониторинга за определенный промежуток времени определяются величинами горизонтальных и вертикальных перемещений деформационных марок, установленных в контролируемых узлах сооружения, которые вычисляются как разность координат и высот соответствующих марок на различных этапах мониторинга. При этом за начальное (отсчетное) положение принимаются результаты 1-го цикла измерений.

Внешние контролируемые узлы. Определение планового и высотного положения внешних контролируемых узлов ПК-модели выполняется путем измерения их пространственных координат в местной системе координат полярным методом со станций предварительно созданной ОГС. С этой целью в каждом цикле измерений через опорные пункты ОГС прокладывается полигонометрический ход по 3-х штативной системе с использованием призмных отражателей (рис. 8).



Рис. 8.
Однопризмный отражатель с визирной маркой.

Плотная городская застройка приводит к необходимости использования большего количества промежуточных станций при проведении ПК-съемки и прокладывания коротких сторон в полигонометрических ходах, что снижает точность ориентировки на последующей станции. Для устранения этого явления рекомендуется использовать стационарные внеходовые дополнительные ориентирные точки, удаленные от станций полигонометрического хода на расстояния, уменьшающие влияние центрировок и редукиций.

Реализация технологии ПК-съемки в условиях стесненного доступа с помощью сферических световозвращающих деформационных марок позволяет повысить эффективность ПК-съемки за счет снижения количества

станций ОГС и увеличения расстояний между ними, что, в свою очередь, влияет на улучшение точности ориентировки при измерениях.

Координаты станций полигонометрического хода $S_1, S_2, S_3 \dots S_{q-1}, S_q$ определяются в выбранной системе координат путём измерения на местности длин линий L_1, L_2, \dots, L_{q-1} , последовательно соединяющих эти станции и образующих полигонометрический ход, а также горизонтальных углов $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_q$ между ними. Полигонометрический ход прокладывается от опорной (начальной) станции $S_i=S_n$ с известными координатами x_n, y_n и заданным дирекционным углом α_n на смежную точку $S_{сн}$. Тогда для станции $k+1$ хода:

$$\begin{aligned} \alpha_k &= \alpha_i + \sum_{k=1}^k \beta_k - k180^0 ; \\ x_{k+1} &= x_i + \sum_{k=1}^k L_k \cos \alpha_k ; \\ y_{k+1} &= y_i + \sum_{k=1}^k L_k \sin \alpha_k , \end{aligned} \quad (1)$$

где

- α_k - дирекционный угол стороны k ;
- x_{k+1}, y_{k+1} - координаты пункта $k+1$ полигонометрического хода;
- L_k - длины линий между пунктами ходами;
- β_k - углы между сторонами хода.

Одновременно с прокладыванием полигонометрического хода производится съёмка деформационных марок в соответствии с их расположением по вертикальным створам ПК-модели. С целью повышения точности измерений съёмка створов по возможности дублируется с соседних станций хода (рис. 9).

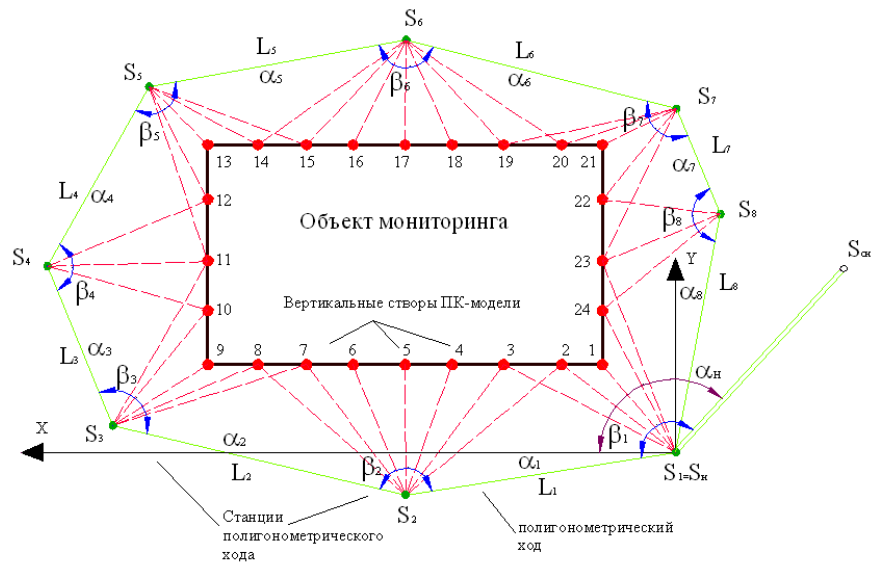


Рис. 9. Тахеометрическая съемка вертикальных створов ПК-модели.

Пространственные координаты деформационных марок, установленных в контролируемых узлах, определяются по результатам измерений расстояний и углов наклона на деформационные марки на основании введенных в прибор значений координат станций хода и высот инструмента (рис. 10).

$$\begin{aligned} x_i &= X_k + N \sin \theta \cos \alpha ; \\ y_i &= Y_k + N \sin \theta \sin \alpha ; \\ z_i &= Z_k + N \cos \theta + I_h , \end{aligned} \quad (2)$$

где

- X_k, Y_k, Z_k - координаты станции k полигонометрического хода;
- x_i, y_i, z_i - координаты i деформационной марки;
- N - наклонное расстояние;
- θ - зенитный угол;
- α - дирекционный угол;
- I_h - высота инструмента.

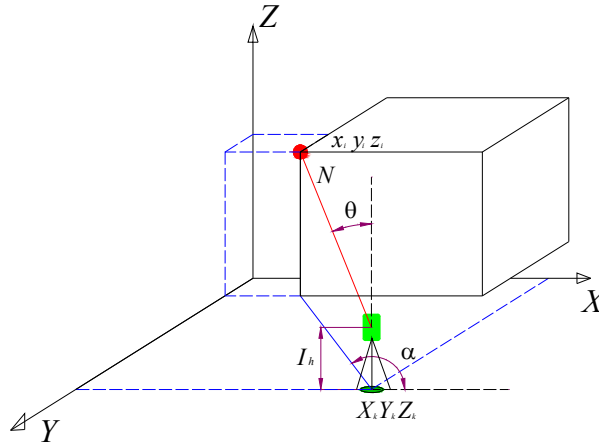


Рис. 10. Определение пространственных координат узлов ПК-модели.

Полигонометрический ход замыкается на начальную станцию $S_q=S_n$ или на станцию $S_q=S_3$ с известными координатами x_3, y_3 и дирекционным углом α_3 на смежную точку S_{c3} .

Использование электронных тахеометров позволяет производить одновременное измерение горизонтальных, вертикальных углов и наклонных расстояний. Встроенное программное обеспечение автоматически вычисляет пространственные координаты визирных целей с учетом поправок в измеряемые расстояния и за наклон вертикальной оси прибора в измеряемые углы.

Величина и направление неравномерной деформации определяется по разности координат деформационных марок за некоторый промежуток времени между нулевым и j -ым циклом мониторинга:

$$\begin{aligned}\Delta X_i^j &= x_i^0 - x_i^j; \\ \Delta Y_i^j &= y_i^0 - y_i^j; \\ \Delta Z_i^j &= z_i^0 - z_i^j,\end{aligned}\tag{3}$$

Направление и величина планового перемещения i контролируемого узла ПК-модели в j цикле мониторинга:

$$\begin{aligned}\Delta XY_i^j &= \sqrt{(\Delta X_i^j)^2 + (\Delta Y_i^j)^2}; \\ \varphi_i^j &= \arctg \frac{\Delta X_i^j}{\Delta Y_i^j},\end{aligned}\tag{4}$$

где

φ - угол горизонтального перемещения.

Пространственное перемещение i контролируемого узла:

$$\Delta XYZ_i^j = \sqrt{(\Delta XY_i^j)^2 + (\Delta Z_i^j)^2};$$
$$\gamma_{i \rightarrow i-1}^j = \arctg \frac{\Delta XY_i^j}{z_i^j - z_{i-1}^j}, \quad (5)$$

где

γ - угол вертикального перемещения.

Направление и величина смещения створа вычисляется аналогичным образом по разности координат верхних и нижних точек (рис. 11).

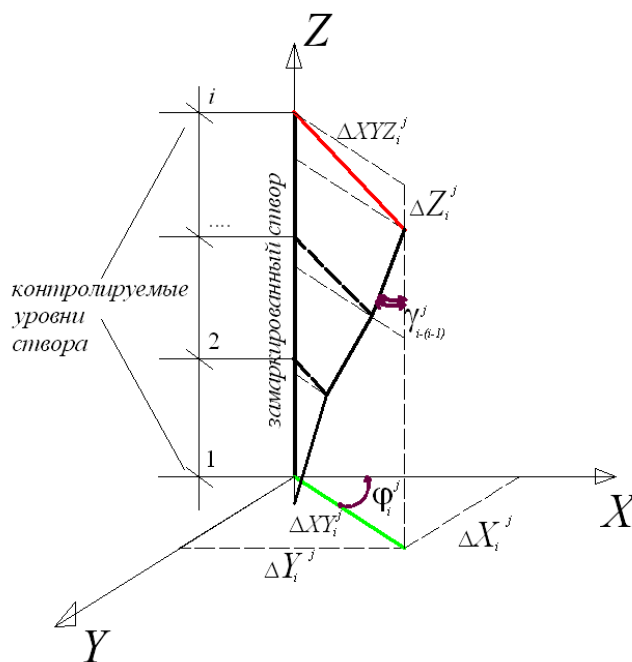


Рис. 11. Пространственное перемещение вертикального створа ПК-модели.

Ввод данных геодезического мониторинга в расчетную МКЭ-систему в каждом цикле измерений предполагает наложение на соответствующие узлы МКЭ-модели перемещений по направлению ее глобальных осей. В большинстве случаев данные оси совпадают с направлением главных осей сооружения. Если направление осей заданной условной системы координат ПК-съемки не совпадает с направлением глобальных осей МКЭ-модели

необходимо пользоваться формулами перевода значений перемещений из одной системы координат в другую (рис. 12):

$$\begin{aligned}\bar{x}_i^j &= (x_i^j - X_0) \cos \alpha - (y_i^j - Y_0) \sin \alpha; \\ \bar{y}_i^j &= (x_i^j - X_0) \sin \alpha + (y_i^j - Y_0) \cos \alpha.\end{aligned}\quad (6)$$

$$\begin{aligned}\Delta \bar{X}_i^j &= \Delta X_i^j \cos \alpha - \Delta Y_i^j \sin \alpha; \\ \Delta \bar{Y}_i^j &= \Delta X_i^j \sin \alpha + \Delta Y_i^j \cos \alpha,\end{aligned}\quad (7)$$

где

X_0, Y_0 - координаты начала глобальной системы координат МКЭ-модели с осями \bar{X}, \bar{Y} в условной системе X, Y ПК-съёмки;

α - угол поворота одной системы координат относительно другой.

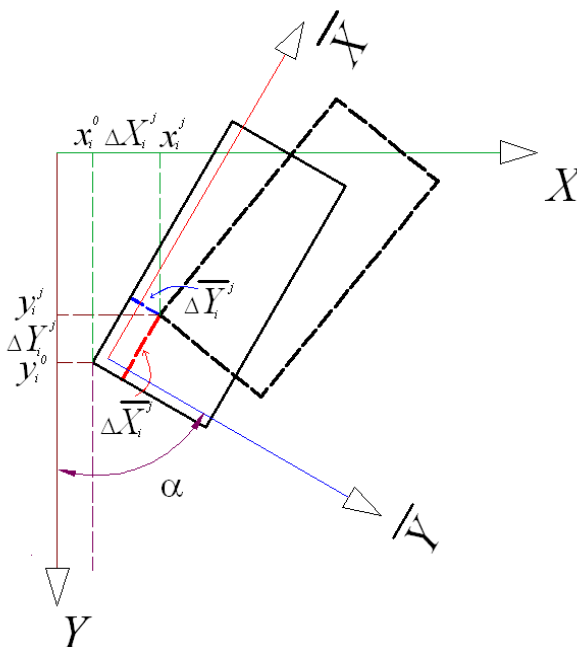


Рис. 12. Перевод значений перемещений узлов ПК-модели из местной системы геодезической съёмки в глобальную систему МКЭ-модели.

Внутренние контролируемые узлы. Превышения между внутренними контролируемыми узлами ПК-модели определяются путем прокладывания хода последовательного геометрического нивелирования, начиная от опорного репера, имеющего известную отметку, с последующей передачей отметок на необходимый этаж (уровень) здания и дальнейшей съёмкой всех замаркированных точек. Таким образом, отметка i осадочной марки в каждом цикле:

$$H_i^j = H_{pen} + \sum_{n=1}^n h^j, \quad (8)$$

где

- H_{pen} - отметка опорного репера;
 n - количество осадочных марок;
 h^j - превышения между точками нивелирной сети в j цикле мониторинга.

Вертикальная осадка i внутренней осадочной марки составляет:

$$\begin{aligned} \Delta z_i^j &= H_i^{j-1} - H_i^j; \\ \Delta Z_i^j &= H_i^0 - H_i^j, \end{aligned} \quad (9)$$

где

- Δz_i^j - осадка марки за период времени между циклами измерений;
 ΔZ_i^j - полная осадка марки с нулевого цикла измерений.

Лекция 7

1.1. Обоснование требований к точности измерений для определения деформаций ПК-моделей.

1.1.1. Требования к точности измерений при проведении ПК-съёмки.

Геодезические измерения пространственного положения объекта мониторинга, как и любые другие виды измерений, при повторных определениях постоянной величины дают несколько различающиеся результаты, что обусловлено многими факторами, главными из которых являются основные характеристики измерений:

- точность измерения (особо точные, высокоточные, технические);
- достоверность измерения, зависит от выбранных параметров средств измерений и соответствия метрологических характеристик средств измерений требованиям проводимых измерений;
- погрешности измерений:
 - *грубые ошибки* – вызываемые неисправностью измерительных систем, ошибками регистра, резкими ухудшениями внешних условий и т.д., выявляются методами математической статистики, что требует производство повторных измерений или контролируется выполнением аксиоматических показателей $\sum \Delta Z = 0, \sum \Delta X = 0, \sum \Delta Y = 0$;
 - *систематические* – порожденные несовершенством приборов, разработки теории методов измерений, неточной градуировкой измерительной аппаратуры, изменениями условий измерений, исключаются введением поправок, найденных экспериментально;
 - *случайные* – влияние неконтролируемых факторов (неточность отсчетов, случайные колебания температуры, вибрация и т.п.), оцениваются методами математической статистики по данным многократных измерений;

Точность измерения деформаций ПК-модели обуславливается техническим заданием на производство работ, нормативными документами, либо, в случае необходимости, ее специально рассчитывают. Требуемая

точность определяет выбор класса точности измерений и характеризуется средней квадратической погрешностью (СКП).

Точность проведения съемки пространственного положения контролируемых узлов ПК-модели определяется различными источниками возникновения погрешностей:

- погрешности исходных данных (m_s);
- погрешности центрирования (m_c);
- погрешности визирования (m_v);
- погрешности влияния внешних условий (m_a);
- инструментальные погрешности (m_d).

В общем случае полная СКП погрешность измерения координат узлов ПК-модели:

$$m_i^2 = m_s^2 + m_c^2 + m_v^2 + m_a^2 + m_d^2 + \dots + m_n^2 = \sum_{n=1}^n m^2. \quad (1)$$

В большинстве случаев необходимая точность измерений перемещений объекта мониторинга и соответствующие им классы точности определяются на основании нормативных требований, при этом измерения вертикальных перемещений делятся на три класса точности, горизонтальных – на четыре. Для удобства определения точности измерения перемещений данные представлены в схематическом виде на рис. 1.

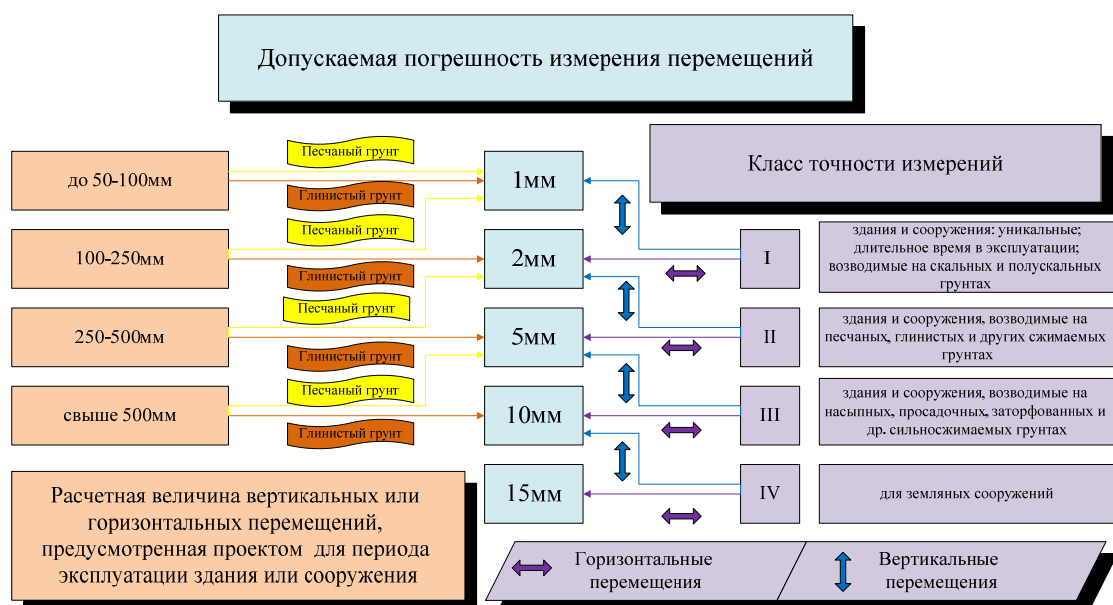


Рис. 1. Определение допускаемой погрешности измерений.

Достоверность измерений перемещений оценивается соотношением СКП метода измерений с величиной прогнозируемого перемещения, путем вычисления вероятности наступления события.

1.1.2. Расчеты точности измерений при проведении ПК-съёмки.

Расчеты точности геодезической съёмки определяют проект производства работ: методику измерений, допускаемые отклонения, условия измерений. Заниженные требования к точности не выявляют наличия деформационного процесса. Завышение требований, в свою очередь, ведет к увеличению сроков выполнения геодезических работ и их стоимости.

Согласно общему виду представления процесса расчета точности инженерно-геодезических работ, при расчете точности ПК-съёмки различают прямую и обратную задачу.

	Прямая задача	Обратная задача
Цель:	оценка точности	расчет точности
Дано:	$B_k ; \eta_k$	$\Delta A_i ; \xi_i$
Определить:	ξ_i	$B_k ; \eta_k$
Условие:	$\xi_i \leq \Delta A_i$ - условие выполнено $\xi_i \geq \Delta A_i$ - условие не выполнено	

Здесь

- A_i - значения перемещений i узла ПК-модели, вычисленные как разности соответствующих координат в разных циклах измерений;
- ΔA_i - допускаемая (нормативная) СКП измерений перемещений
 $СКП_{\Delta X(Y)}$ - горизонтальных, $СКП_{\Delta Z}$ - вертикальных;
- B_k - стандартные измерения на k станции хода:
 α, β, L - соответственно дирекционный угол, угол стороны и длина линии в полигонометрическом ходе,
 N, θ, λ - соответственно наклонное расстояние, зенитный угол, полярный угол при съёмке марок,
 h - превышение в нивелирном ходе;
- η_k - СКП измерений
 $m_\alpha, m_\beta, m_L,$
 $m_N, m_\theta, m_\lambda,$
 $m_h;$
- ξ_i - СКП определения координат i деформационной марки

$m_{x(y)}, m_z$.

Приведенные выше величины связаны следующими общими соотношениями:

$$\begin{aligned} A_i &= \varphi_i(B_1, \dots, \hat{A}_q), \text{ при } i \rightarrow n; \\ \xi_i &= \psi_i(B_1, \dots, \hat{A}_q, \eta_1, \dots, \eta_q). \end{aligned} \quad (2)$$

где

n - количество деформационных марок;
 q - количество пунктов ОГС.

В результате решения прямой задачи оценивается фактическая точность измерений при использовании конкретных ОГС и измерительных приборов. При необходимости обеспечить заданную точность измерений решается обратная задача.

В условиях наличия измерительной аппаратуры конкретных типов решается прямая задача. В данном случае контроль и оценка точности по результатам измерений проводится при замыкании полигонометрического хода на начальную точку $S_q=S_n$ или на точку $S_q=S_3$ с известными координатами x_3, y_3 и дирекционным углом α_3 на смежную точку S_{c3} . Ошибки определения координат станций сети возрастают пропорционально удалению от начального пункта в связи с тем, что измеренные стороны и углы содержат погрешности соответственно dL_1, dL_2, \dots, dL_n и $d\beta_1, d\beta_2, \dots, d\beta_{n+1}$. Угловые и линейные невязки хода:

$$\begin{aligned} f_\alpha &= \alpha_q - \alpha_n \quad \text{или} \quad f_\alpha = \alpha_q - \alpha_3; \\ f_x &= x_q - x_n \quad \text{или} \quad f_x = x_q - x_3; \\ f_y &= y_q - y_n \quad \text{или} \quad f_y = y_q - y_3. \end{aligned} \quad (3)$$

Полная линейная невязка:

$$f_p = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}. \quad (4)$$

Относительная невязка в периметре хода:

$$\frac{f_p}{\sum L} \leq \frac{1}{N}. \quad (5)$$

где

N - знаменатель допустимой относительной погрешности хода.

При построении ОГС методом полигонометрии точность линейных и угловых измерений может также рассчитываться по составляющим ошибкам координат – поперечному и продольному сдвигу. Поперечный сдвиг:

$$m_u = \frac{m_\beta}{\rho} L \sqrt{\frac{q+3}{12}}. \quad (6)$$

Продольный сдвиг:

$$m_t = m_D \sqrt{q}. \quad (7)$$

При опирании полигонометрического на два исходных пункта в середине хода:

$$m_t^{med} = \frac{m_D \sqrt{q}}{2}. \quad (8)$$

Приближенная оценка СКП одиночных ходов с примерно одинаковыми сторонами, опирающиеся на 2 исходных пункта для изогнутого хода:

$$M^2 = m_D^2 q + \frac{m_\beta^2}{\rho^2} [D_{0,k}^2], \quad (9)$$

где

$D_{0,k}^2$ - расстояние от каждой вершины хода до его центра.

Предельная относительная невязка хода:

$$\frac{2M}{[L]} \leq \frac{1}{N}, \quad (10)$$

где

L - длина хода.

Невязка замкнутого нивелирного f хода определяется по разности между высотами H соответствующей осадочной марки i замыкания хода при числе станций n :

$$f = H_i^K - H_i^H \leq \begin{cases} \pm 0.15\sqrt{n} - I \text{ класс точности} \\ \pm 0.5\sqrt{n} - II \text{ класс точности} \\ \pm 1.5\sqrt{n} - III \text{ класс точности} \\ \pm 5.0\sqrt{n} - IV \text{ класс точности} \end{cases} \quad (11)$$

Средняя квадратичная погрешность m_h превышения на станции по результатам двойных измерений:

$$m_h \leq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{[d^2]}{n}}, \quad (12)$$

где

d - разность двойных измерений на станции;
 n - общее число разностей в нивелирной сети.

Для замкнутых ходов оценка точности выполняется по СКП m_h превышения на станции:

$$m_h \leq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{[f^2]}{K \cdot n}}, \quad (13)$$

где

f - невязка замкнутого хода, мм;
 K - число ходов;
 n - число нивелирных станций в ходе.

Для одиночных ходов СКП определения высоты вычисляется по следующей формуле:

$$m = m_h \sqrt{n}, \quad (14)$$

где

n - число нивелирных станций в ходе до наиболее удаленной марки.

СКП определения перемещений деформационных марок согласно теории погрешностей измерений:

$$m_{\Delta X(\Delta Y)} = \pm m_{x(y)} \sqrt{2} \leq m_{\Delta X(\Delta Y)}^{i\ddot{o}i}; \quad m_{\Delta Z} = \pm m_{z(h)} \sqrt{2} \leq m_{\Delta Z}^{i\ddot{o}i}. \quad (15)$$

В случае решения обратной задачи оценка точности построения проектируемой ОГС заключается в определении ожидаемых погрешностей координат узловых пунктов, относительных ошибок ходов и сравнении их с

допустимыми значениями. В основе предварительных расчетов точности измерения в сети лежат зависимости:

$$m_F = \mu \sqrt{\frac{1}{P_F}}; \quad (16)$$

$$\frac{1}{P_F} = f_1 f_1 Q_{11} + 2 f_1 f_2 Q_{12} + \dots + 2 f_1 f_t Q_{1t} + \dots + f_2 f_2 Q_{22} + \dots + 2 f_2 f_i Q_{2i} + \dots + f_t f_t Q_{tt} \quad (17)$$

В матричном виде:

$$\frac{1}{P_F} = F_{1t}^T N_{tt}^{-1} F_{1t}; \quad (18)$$

$$\frac{1}{P_{x_i}} = Q_{ii}, \quad (19)$$

где

m_F - СКП функции оцениваемого элемента сети;

μ - СКП единицы веса измерений;

$1/P_F = Q_F$ - обратный вес функции оцениваемого элемента сети.

Обратные веса зависят от размеров, конструкции сети и места элемента в ней:

$$m_F = \mu \sqrt{\frac{1}{P_F}} \cong f(m_\beta, m_D, k, q, g); \quad (20)$$

где

m_β, m_D - СКП угловых и линейных измерений;

k - номер оцениваемого элемента в сети;

q - количество пунктов ОГС;

g - показатель конструкции сети.

Расчет точности может производиться 2-мя способами.

1. По вычисленной величине Q_F и известному значению μ , соответствующую определенному нормативному классу точности, определяется ошибка m_F функции оцениваемого элемента сети и сравнивается с нормативной.

2. По вычисленной величине Q_F и задаваемому значению m_F определяется μ и выбирается методика измерений.

Предварительный расчет необходимой точности измерений координат контролируемых узлов может также производиться по формуле:

$$\mu \leq m_{\Delta X(Y)} / \sqrt{2Q_{x(y)}}; \quad \mu \leq m_{\Delta Z} / \sqrt{2Q_z}. \quad (21)$$

1.2. Анализ точности измерений деформаций ПК-моделей.

1.2.1. Определение возможности применения различных типов электронных тахеометров для измерения деформаций ПК-моделей.

При работе с электронными тахеометрами измеряемыми величинами являются углы и расстояния, точность измерений которых соответствует заданным техническим характеристикам приборов. Данные величины служат основой для последующих автоматизированных вычислений пространственных координат точек встроенным компьютером по известным математическим зависимостям. В общем случае паспортная точность тахеометров характеризуется СКП (m) измерений горизонтальных углов m_β , расстояний m_D , угла наклона m_θ , при этом

$$m_{xy} = \sqrt{\frac{m_\beta^2 \cdot D^2}{\rho^2} + m_D^2}; \quad (22)$$

$$m_z = \sqrt{ctg^2 \theta \cdot m_D^2 + \frac{D^2 \cdot m_\theta^2}{\sin^2 \theta \cdot \rho^2}}, \quad (23)$$

где

$m_{xy(z)}$ - полный вектор погрешности измерения координат;

D - измеряемое расстояние;

ρ - 206265".

Для проведения измерений деформаций по I классу точности применяются приборы, для которых СКП измерений углов $m_\beta = \pm 1'' \div 2''$ и расстояний $m_D = \pm (0,6 \div 1 \text{ мм} + 1 \div 2 \times 10^{-6} D)$ (рис. 2. кривая 1). К таким приборам относятся:

Sokkia Net1200:	$m_\beta = 1''$,	$m_D = \pm (0,6 \text{ мм} + 2 \times 10^{-6} D)$ на пленку
		$m_D = \pm (2 \text{ мм} + 2 \times 10^{-6} D)$ на призму
Trimble TS3602 DR	$m_\beta = 2''$,	$m_D = \pm (1 \text{ мм} + 1 \times 10^{-6} D)$ на призму
Trimble TS3601 DR	$m_\beta = 1''$,	$m_D = \pm (1 \text{ мм} + 1 \times 10^{-6} D)$ на призму
Trimble S8	$m_\beta = 1''$,	$m_D = \pm (1 \text{ мм} + 1 \times 10^{-6} D)$ на призму

Точность наиболее распространенных тахеометров, применяемых для проведения измерений деформаций в соответствии со II и ниже классами точности измерений, характеризуется $m_{\beta}=\pm 3''\div 6''$ и $m_D=\pm(2\div 3\text{мм}+1\div 3\times 10^{-6}D)$ (рис. 2.15 кривая 2).

В таблице 2.2 приведены основные характеристики тахеометров ведущих фирм производителей в соответствии с DIN18723. Из таблицы следует, что выбор режима измерений (марка/призма/без отражателя) в приборе влияет на точность измерения расстояний.

Таблица 1

Основные технические характеристики точности и дальности измерений электронных тахеометров					
Технические характеристики	<i>Sokkia Set4110R</i>	<i>Trimble 3605R</i>	<i>Sokkia Set610</i>	<i>Topcon GPT3003N</i>	<i>Leica TCR-403</i>
Угловая точность	5"	5"	6"	3"	3"
Точность измерений расстояний на призму	$\pm(2+2\times 10^{-6}D)$	$\pm(1+1\times 10^{-6}D)$	$\pm(2+2\times 10^{-6}D)$	$\pm(3+2\times 10^{-6}D)$	$\pm(2+2\times 10^{-6}D)$
Точность измерений на пленку, мм	$\pm(4+2\times 10^{-6}D)$	$\pm(1+1\times 10^{-6}D)$	$\pm(4+3\times 10^{-6}D)$	-	-
Точность измерений без отражателя, мм	$\pm(5+3\times 10^{-6}D)$	$\pm(3+2\times 10^{-6}D)$	-	$\pm(2+2\times 10^{-6}D)$	$\pm(3+2\times 10^{-6}D)$
Дальность измерений на призму, м	До 4000м	До 3000м	До 1800м	До 3500м	До 3500м
Дальность измерений на пленку, м	До 500м	До 800м	До 60м	-	-
Дальность измерений без отражателя, м	До 85м	До 120м	-	До 250м	До 80м

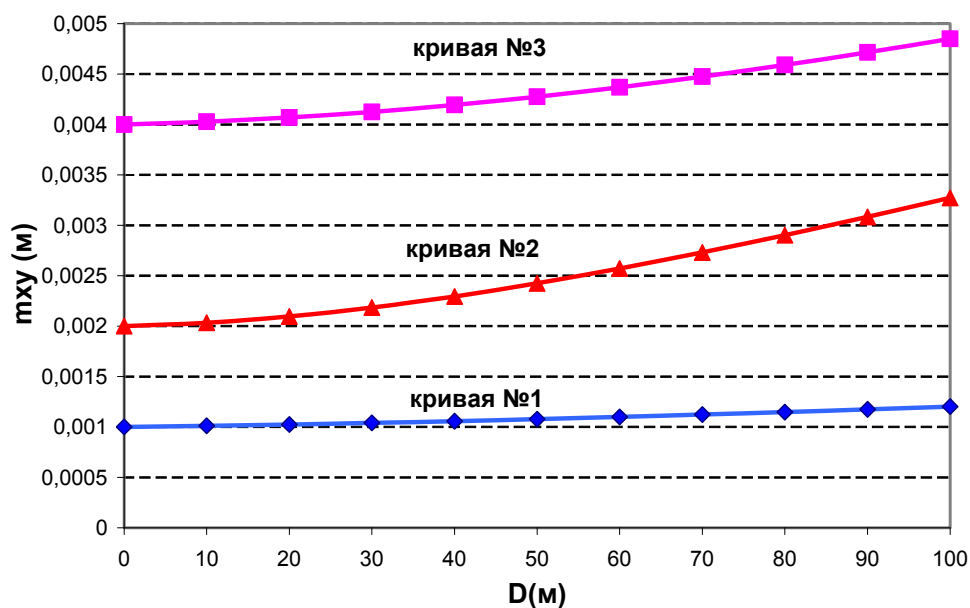


Рис. 2. Теоретическая кривая зависимости абсолютной СКП измерения координат (m_{xy}) от величин расстояний.

Кривая 1: $m_{\beta}=\pm 1''$ и $m_D=\pm(1\text{мм}+1\times 10^{-6}D)$ – призма (Sokkia Net1200)

Кривая 2: $m_{\beta}=\pm 5''$ и $m_D=\pm(2\text{мм}+2\times 10^{-6}D)$ – призма (Sokkia Set4110)

Кривая 3: $m_{\beta}=\pm 5''$ и $m_D=\pm(4\text{мм}+2\times 10^{-6}D)$ – пленка (Sokkia Set4110)

На рис. 2. представлены теоретические зависимости СКП измерений координат от величин расстояний, соответствующие техническим характеристикам приведенных выше тахеометров, что позволяют определить область их применения в зависимости от требуемой точности к измерениям перемещений.

Например, предельная дальность для измерения горизонтальных перемещений по I классу точности тахеометром Net1200 превышает 100 метров (кривая №1), а тахеометром Set4110 только 20 метров (кривая 2). Соответственно для II класса точности предельная дальность измерений координат тахеометрами Net1200 и Set4110 превышает 100 метров.

Точность измерений перемещений зависит также от дополнительных факторов, таких как метеоусловия (температура, атмосферное давление, влажность), константы прибора и отражателя и др. Учет данных факторов производится за счет ввода необходимых поправок в прибор автоматически или после их определения. Неправильное вычисление величин поправок или

их недостаточный учет приводят к снижению заявленной точности работы прибора.

Оценка фактической точности измерений деформаций конкретным тахеометром определяется по повторяемости результатов измерений, выполненных на стабильном сооружении при постоянных условиях за короткий промежуток времени.

1.2.2. Характеристики точности нивелиров.

Приборы для геометрического нивелирования при измерений осадок сооружений классифицируют по точности:

- высокоточные - I класс нивелирования (СКП 0,3-0,5мм на 1 км двойного хода);
- точные - II класс нивелирования (СКП 2-3мм на 1 км двойного хода).

Такие приборы обеспечивают точность нивелирования I-II класса.

На сегодняшний день для проведения геодезических измерений осадок сооружений в основном применяются цифровые нивелиры, обладающие преимуществами перед традиционными оптическими, что значительно ускоряет процесс измерений, повышает точность, производительность и качество выполняемых работ.

Точность нивелирования повышается за счет использования штрихкодовых инварных реек, исключающие возможность взятия неверного отсчета в результате личных ошибок наблюдателя, а также имеющих преимущества по сравнению с менее точными фиброглассовыми рейками, обладающими большим коэффициентом температурного расширения.

Для мониторинга деформаций большинства строительных объектов достаточно использование нивелиров, обеспечивающих нивелировку по II классу точности.

В таблице 2 приведены выборочные характеристики нивелиров ведущих фирм производителей в соответствии с DIN18723.

Таблица 2

Основные технические характеристики нивелиров				
Технические характеристики	<i>Sokkia SDL30</i> (цифр. точн.)	<i>Trimble DINI 12</i> (цифр. вточн.)	<i>Sokkia C300</i> (оптич.)	<i>Topcon DL-103C</i> (цифр. точн.)
Погрешность измерения превышений (СКП) на 1 км двойного хода				
Электронное измерение, мм				
инварная рейка	-	0.3	-	1.8
фибергласовая рейка	1.0	1.0	-	-
Оптическое измерение, мм	1.0	1.5	2.0	2.0
Погрешность измерения расстояний				
Электронное измерение				
инварная рейка	-	$\pm(0.5D \times 0.001)_M$	-	1-5см
фибергласовая рейка	$\pm(1.0D \times 0.001)_M$		-	-

1.3. Математическая обработка результатов измерений при ПК-съёмке.

1.3.1. Уравнивание результатов измерений.

Нормативными документами предписывается выполнять математическую обработку результатов измерений путем уравнительных вычислений. Однако, как показывает опыт, введение поправок в результаты повторных измерений при мониторинге не всегда увеличивает достоверность общей картины деформаций.

Контроль точности измерений при ПК-съёмки, выполняемых с помощью имеющихся в распоряжении электронных тахеометров и нивелиров, обеспечивается в процессе уравнивания геодезических измерений, что позволяет ослаблять влияние всегда имеющих место в ходе измерений случайных погрешностей. Его суть заключается в получении вероятнейшего значения координат узлов ПК-модели при наличии избыточных измерений с последующей оценкой точности результатов и устранением невязок, обусловленных наличием ошибок измерений. Это

достигается путём ввода поправок к измеренным величинам (углам, расстояниям), либо к их функциям (координатам узлов ПК-модели).

В основе процедуры уравнивания геодезических измерений лежат теория вероятностей и математическая статистика. Поправки к измеренным величинам, являясь случайными величинами, подчиняются нормальному закону распределения случайных величин, основными характеристиками которого являются: функция распределения, функция плотности распределения, математические ожидания, дисперсии и среднеквадратичные отклонения.

Процедура уравнивания может выполняться 2-мя методами: нестрогим (раздельным) и строгим методом.

1.3.2. Нестрогое (раздельное) уравнивание планово-высотных сетей.

Нестрогий метод применяется при относительно небольших количествах пунктов полигонометрического хода. В данном случае координатные невязки распределяются в приращениях пропорционально длинам сторон хода, а его точки смещаются в направлении параллельном невязке хода:

$$\Delta x_i = \frac{f_x L_i}{\sum L}; \quad \Delta y_i = \frac{f_y L_i}{\sum L}. \quad (24)$$

Угловая невязка распределяется поровну между углами и вводится с обратным знаком в значения измеренных углов:

$$v_i = \frac{f_\alpha}{k}. \quad (25)$$

1.3.3. Строгое уравнивание планово-высотных сетей.

При больших количествах пунктов полигонометрического хода для повышения точности и надежности вычислений, а также в качестве гарантии недопущения ошибок необходимо применять строгое уравнивание измерений, которое позволяет добиться равномерного распределения невязок, соответствующего их накоплению. Для начала определяются

окончательные значения координат узловых пунктов и дирекционные углы узловых направлений, а затем по этим данным уравниваются отдельные хода.

При строгом уравнивании геодезических измерений применяется метод наименьших квадратов (МНК) (рис. 3), основанный на минимизации взвешенной суммы квадратов (26) всех поправок и традиционно реализующийся коррелятным или параметрическим способом.

$$[pv^2] = \min . \quad (26)$$



Рис. 3. Метод наименьших квадратов.

Основные этапы процесса уравнивания:

- составление условных уравнений или уравнений погрешностей;
- составление нормальных уравнений;
- решения нормальных уравнений методом последовательного исключения неизвестных (схема Гаусса) или методом итерации (приближений);
- при отсутствии нормальных уравнений неизвестные определяются непосредственно из решения условных уравнений или уравнений погрешностей;
- оценки точности измеренных и уравненных величин методами приемами математической статистики: корреляционный и регрессионный анализы.

Коррелатный способ уравнивания. Для всех условий в сети система уравнений поправок в векторно-матричной форме:

$$A\bar{v} = \bar{w}, \quad (27)$$

где

- A - матрица коэффициентов (+1, 0, -1) уравнений поправок;
- \bar{v} - вектор искомых поправок;
- \bar{w} - вектор вычисленных невязок.

Матрица нормальных уравнений имеет вид:

$$N = A^T P A, \quad (28)$$

где

P - диагональная матрица весовых коэффициентов.

Векторы коррелат:

$$\bar{K} = -(AP^{-1}A^T)\bar{w}. \quad (29)$$

Вектор поправок:

$$\bar{v} = P^{-1}A^T\bar{K}. \quad (30)$$

Для оценки точности вычисляют СКП единицы веса

$$\mu^2 = \bar{v}^T P \bar{v} / r \quad \text{или} \quad \mu^2 = \bar{w}^T (AP^{-1}A^T)^{-1} / r. \quad (31)$$

Параметрический способ уравнивания. Для всех уравнений поправок в векторно-матричной форме:

$$\bar{v} = A\bar{\delta} + \bar{l}. \quad (32)$$

где

- \bar{v} - вектор с $3n$ поправками в измеренные величины;
- A - матрица коэффициентов уравнений поправок размера $3n \times 3k$;
- $\bar{\delta}$ - вектор с $3k$ поправками в координаты определяемых пунктов;
- \bar{l} - вектор с $3n$ величинами, определяемыми по данным измерений координат пунктов.

В соответствии с требованиями МНК, чтобы взвешенная сумма квадратов поправок была минимальной:

$$\bar{v}^T P \bar{v} = 0. \quad (33)$$

Система нормальных уравнения для вычисления параметров δ :

$$A^T P A \bar{\delta} + A^T P \bar{l} = 0. \quad (34)$$

Для оценки точности вычисляются:

- СКП единицы веса

$$\mu^2 = \bar{v}^T P v^T / 3(n - k); \quad (35)$$

- ковариационная матрица поправок в координаты пунктов

$$Q = (A^T P A)^{-1}. \quad (36)$$

Оценка погрешности координат пунктов и функции F при заданном значении стандарта единицы веса:

$$\sigma_{x_k}^2 = \mu^2 Q_{x_k x_k}; \quad \sigma_{y_k}^2 = \mu^2 Q_{y_k y_k}; \quad \sigma_F^2 = \mu^2 \bar{f}^T Q \bar{f}, \quad (37)$$

где

x_k, y_k - координаты пункта k ;
 $Q_{x_k x_k}, Q_{y_k y_k}$ - диагональные элементы матрицы Q ;
 \bar{f} - вектор частных производных функции F .

Применение современных тахеометров и нивелиров позволяет эффективно осуществлять компьютерную обработку электронных данных специализированными программными средствами, что приводит к повсеместному внедрению строгих методов уравнивания и полной оценке точности измерений. К ним относятся геоинформационные системы (ГИС): AutoCAD Civil 3-D (Autodesk США), Topocad (SMT Datateknik Швеция), Caddy (Ziegler Германия), CREDO («Кредо-Диалог» Белоруссия), «Топоград» (Украина), и FieldWorks корпорации Intergraph и др.

Данные программные средства позволяют гибко и быстро осуществлять камеральную обработку результатов геодезических измерений, производить выбор типов геодезических приборов, задавать допустимые ошибки измерений для различных видов измерений и методов съемки с

указанием доверительных интервалов, вводить необходимые поправки и константы в измерения и т.д.

1.4. Технология автоматизированного построения ПК-моделей.

Создание ПК-моделей, начиная с полевой съемки сооружения и заканчивая формированием готовой 3-D схемы может быть полностью автоматизированным процессом. Использование цифровой геодезической аппаратуры позволяет реализовать технологию автоматизированного построения ПК-моделей объектов мониторинга с использованием специального разработанного программного обеспечения, выполняющего автоматизированный перевод геодезической информации непосредственно в электронный чертеж [64-67,70]. Данное программное обеспечение входит в состав так называемого измерительно-информационного комплекса (ИИК), основной целью которого является обеспечение ускоренного сбора геодезической информации и автоматизированного построения на ее базе чертежей зданий и сооружений. В основе ИИК лежит использование современных геодезических приборов (тахеометров и лазерных дальномеров) и набора программных средств для обработки данных измерений.

Техническая часть ИИК базируется на использовании тахеометров фирмы Sokkia. Программная часть комплекса базируется на системе предварительной обработки геодезической информации ProLink фирмы Sokkia и системе построения электронных чертежей AutoCAD фирмы Autodesk, которая обладает двумя принципиальными преимуществами перед другими аналогичными системами:

- DXF-формат представления данных, который является универсальным форматом обмена данными с другими системами, в частности с МКЭ-системами и системами обработки геодезической информации;
- наличие встроенного языка внутреннего программирования AUTOLISP, позволяющего настроить AutoCAD для автоматического

выполнения специфических технических задач, в частности, построения чертежей на базе геодезической информации.

Общую последовательность действий при автоматизированном построении ПК-модели сооружения можно представить в следующем виде:

1. Определение координат контролируемых узлов сооружения с помощью геодезических приборов.
2. Обработка и подготовка информации с помощью пакета PROLINK.
3. Автоматическое построение каркаса ПК-модели сооружения (аксонометрии и плоских чертежей) в системе AutoCAD.

Информация, накопленная в приборах в процессе проведения измерений, перекачивается затем в компьютер с помощью специализированного пакета обработки геодезической информации PROLINK. Данный пакет имеет возможность модифицировать информацию и сохранять ее в файлах формата DXF нескольких типов, которые входят в состав многочисленных форматов представления данных в системе AutoCAD.

DXF-файлы представляют собой текстовые файлы определенного формата, в которых обычно содержится информация о графических объектах чертежа AutoCAD: названия слоев, типы и описания геометрических объектов. Кроме того, с каждым объектом могут быть связаны другие числовые и символьные значения, необходимые для разнообразных графических построений. Таким образом, DXF-файл может содержать не только числовую информацию, достаточную для построения ПК-модели, но и текстовую информацию, включая семантические (смысловые) описания, что позволяет группировать данные внутри AutoCAD по определенным признакам при построении чертежей. Подготовка дополнительной информации для анализа связей точек измерений при создании ПК-модели сооружения в формате так называемой матрицы ребер проводится в пакете MSExcel, файлы которого затем передаются в графическую систему AutoCAD.

Для того чтобы, на основе подготовленной и скорректированной информации о геометрических параметрах сооружения, представленной координатами контролируемых узлов AutoCAD в автоматическом режиме построил аксонометрические и плоские чертежи ПК-модели, нужно осуществить его настройку путем загрузки файла программы на языке AutoLISP.



Рис. 4. Структурная блок-схема алгоритма модуля KARKAS.LSP.

Данную функцию выполняет текстовый файл с условным названием KARKAS.LSP, представляющий собой программное описание последовательности функций, выполняющих набор задач, решаемых для автоматизированного построения чертежей (рис. 4).

Функция LPOINTS считывает файл STRUCT.DXF, анализирует его содержимое, распознает координаты и номера контролируемых узлов, организует их в виде списка (n_i, x_i, y_i, z_i) .

Функция LREBER считывает из файла M_REBER.TXT номера соединяемых точек, анализирует их связи и организует список ребер.

Функция LPOINTS_NEW корректирует координатную информацию на предмет устранения погрешностей, ведущих к резкому искажению результатов геодезических измерений.

Функция LIMITS определяет масштаб чертежа сооружения для его размещения на листе заданного формата путем анализа координат измеренных точек с целью выявления крайних значений, необходимых для определения границ поля черчения.

Функция AKS по скорректированным координатам точек и по матрице ребер вычерчивает аксонометрию ПК-модели сооружения, в форме так называемой каркасно-точечной модели и запоминает ее в файле AKS.DWG.

Сформированные таким образом файлы с расширением DWG являются стандартными файлами системы AutoCAD и представляют собой базовые чертежи ПК-модели сооружения, которые могут быть неполными и в дальнейшем подвергаться редактированию, дополнению недостающей информацией в ручном режиме. При необходимости ПК-модель может служить основой для построения расчетной модели сооружения, путем преобразование плоских и пространственных изображений из DXF файлов в МКЭ-модель.

Лекция 8

1.1. Применение МКЭ для оценки НДС конструкций сооружений на стадии проектирования зданий и сооружений.

1.1.1. Общие принципы построения и расчета МКЭ-моделей сооружений.

Плотная городская застройка, а также совершенствование и усложнение конструкций зданий и сооружений требует особого подхода в расчете конструкций, использование последних технологий и методик расчета. Таким образом, для решения этой задачи всё чаще и чаще привлекают современные программные комплексы расчета и анализа конструкций и сооружений, основанные на методе конечных элементов (МКЭ).

Помимо общепринятых расчетов, с основами которых вы можете ознакомиться в литературе, создается максимально подробная пространственная модель проектируемого здания, по возможности с учетом нелинейной работы материалов конструкций, податливостью стыков, односторонним характером связей конструкций фундаментов с основанием и т.д.

На сегодняшний день существует ряд программных комплексов для решения подобных задач, работа которых основана на методе конечных элементов. Например, такие ПК, как ANSYS, ABAQUS, NASTRAN, Robot Millenium, ПК Лира, МОНОМАХ.

Схема создания пространственной МКЭ–модели во всех программных комплексах выглядит следующим образом:

- задание системы координат;
- создание геометрии модели;
- задание типов конечных элементов используемых в модели;
- задание нагрузок;
- задание граничных условий;
- задание свойств материалов.

Далее более подробно рассмотрим каждый пункт схемы.

Системы координат

Перед заданием геометрии конструкции необходимо определить систему координат. По умолчанию используется встроенная глобальная декартова система координат. Однако, в зависимости от конструкции, может быть более удобным задавать геометрию в системах координат других типов, таких как, локальные декартовы, цилиндрические и сферические координатные системы.

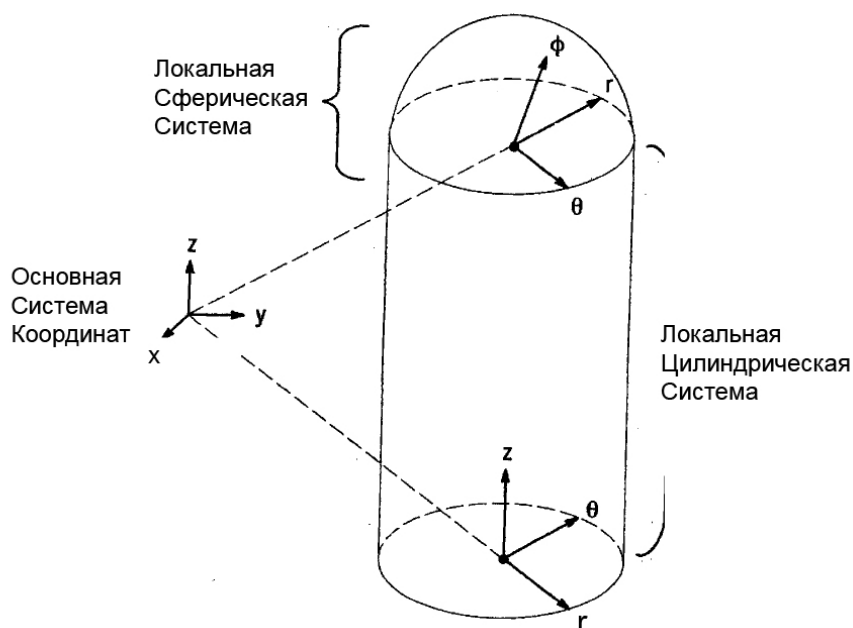


Рис. 1

Геометрия модели

Значительная часть рабочего времени расчетчика уходит на корректное описание геометрии модели. Необходимые для этого данные могут быть получены из распечаток, из баз данных систем автоматизированного проектирования (CAD) или из чертежей.

Геометрия модели задается координатами узловых точек. Каждая узловая точка модели имеет 6 возможных компонент перемещений: 3 поступательных (в X -, Y - и Z - направлениях) и 3 поворота (вокруг X -, Y - и Z - осей). Эти компоненты перемещений называются степенями свободы.

Конечные элементы

Заданные узловые точки связываются конечными элементами. В линейном статическом анализе элементы представляются упругими пружинами, и эта математическая аппроксимация соответствует очень малой области реального поведения конструкции. Целью конечно–элементного моделирования является составление из этих дискретных «пружинок» математической модели, наиболее достоверно описывающей реальную конструкцию.

Современные программные комплексы содержат обширную библиотеку конечных элементов, позволяющих моделировать разнообразное физическое поведение. Наиболее часто используемые в линейном статическом анализе конечные элементы (в самом простом виде) представлены на рисунке.



Рис. 2

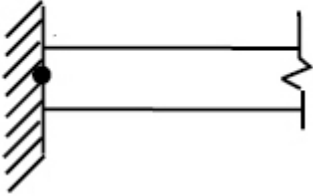
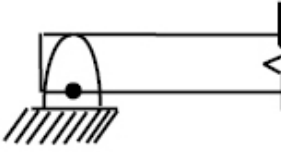
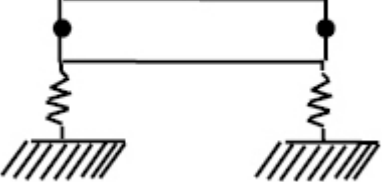
Нагрузки

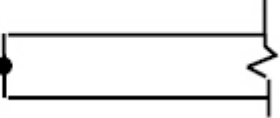
Современные расчетные комплексы дают возможность моделировать много типов нагрузок из различных инженерных дисциплин: статические нагрузки, переменные по времени, возбудители собственных колебаний, температурные нагрузки, сейсмические. А также к примеру, сосредоточенные силы и моменты, нагрузки, распределенные по длине балок, давление на поверхность, гравитационная нагрузка, нагрузки от заданного ускорения, заданные перемещения (натяги).

Граничные условия

Ответом конструкции на приложенные нагрузки являются реакции в точках закрепления конструкции, где наложены ограничения перемещений по определенным степеням свободы. Примеры простых ограничений показаны ниже:

Таблица 1

Закрепленное		(полностью защемленный)
Шарнирно–закрепленные		(частично защемленный)
Упругое закрепление		(частично защемленный)

Свободное		(без заземления)
-----------	---	------------------

В большинстве случаев граничные условия моделируются заданием для соответствующих степеней свободы нулевых перемещений.

Свойства материалов

Большинство программных комплексов предоставляет широкий выбор при задании свойств материалов: изотропный, анизотропный, ортотропный, нелинейный с зависимостью свойств от напряжений, жидкость, с зависимостью свойств от температуры, композиционный.

1.1.2. Основные отличия построения МКЭ-моделей проектируемых и эксплуатируемых сооружений.

МКЭ-модель любого сооружения, в том числе и уже существующего, формируется согласно традиционному подходу, отраженному в научно-технической, справочной и учебной литературе.

При формировании расчетной схемы (МКЭ-модели) проектируемого нового сооружения исходной информацией служат данные, полученные в ходе инженерных изысканий участка застройки, данные, представленные архитекторами и конструкторами в ходе проектной проработки объекта строительства.

Параметры объекта фактически задаются проектировщиками, считаются неизменными и определяемыми функциональным назначением объекта. Нагрузки на сооружение обуславливаются требованиями СНиП и различными специальными условиями. При этом дискретизация конструкции на КЭ определяется стремлением учесть влияние возможных зон концентрации напряжений, возникающих в силу геометрических неоднородностей самого объекта.

На основании проведенного по результатам расчетов анализа НДС конструкций объекта устанавливаются окончательные параметры сечений конструктивных элементов, определяемые по величинам внутренних усилий, перемещениям характерных точек, условиям устойчивости, колебаний и т.д., что отражено приведенной ниже последовательностью:

Проект: → геометрия сооружения;
→ материалы конструкций;
→ проектные нагрузки.

Расчет: → НДС конструкций сооружения;

Анализ: ⇒ размеры и расчетные характеристики элементов.

Проведение проверочных расчетов несущей способности конструкций существующих зданий и сооружений отличается от описанной выше схемы, тем, что основой для составления расчетной схемы объекта помимо проектных материалов являются данные инженерно-технического обследования, включающие в себя выявленные неоднородности и повреждения конструкций, накопленные в ходе эксплуатации. Расчетные схемы при проведении проверочных расчетов принимаются с учетом установленных фактических геометрических размеров, соединения и взаимодействия конструкций и их элементов, выявленных отклонений при возведении сооружения, фактических свойств материалов, параметров фактически действующих нагрузок. Все данные должны быть правильно учтены при дискретизации модели существующей конструкции на КЭ.

Последовательность действий при построении МКЭ-модели существующего сооружения такова:

Обследование: → фактическая геометрия сооружения;
→ фактические размеры элементов;
→ фактические свойства материалов;

→ фактические нагрузки.

Расчет: → НДС конструкций сооружения.

Анализ: ⇒ оценка НДС конструкций сооружения.

Таким образом, особенности применения МКЭ для анализа НДС конструкций существующих сооружений, в отличие от проектируемых сооружений, определяются способом получения исходных данных для построения расчетной модели и анализом результатов проводимого расчета.

1.2. МКЭ-анализа НДС конструкций эксплуатируемых сооружений в ходе их мониторинга.

1.2.1. Требования к построению МКЭ-модели объекта мониторинга.

В процессе эксплуатации зданий и сооружений необходимо проводить своевременную оценку технического состояния конструкций. По требованиям нормативных документов оценка технического состояния несущих конструкций здания производится с учетом, обнаруженных в ходе обследования дефектов и повреждений.

Схема моделирования при этом может быть представлена следующей последовательностью:

- создается максимально подробная пространственная модель существующего здания, по возможности с учетом нелинейной работы материалов конструкций, податливостью стыков, односторонним характером связей конструкций фундаментов с основанием, т.е. за основу принимается модель, выполненная на стадии проектирования;
- по результатам обследования здания или сооружения определяются дополнительные воздействия на него за период эксплуатации как деформационные (крены, перекосы, дефекты), так и силовые, на которые и выполняется расчет подробной модели;

- проверяется адекватность расчетной модели сопоставлением результатов натурных наблюдений и результатов расчета, причем показателем достоверности может служить совпадение мест расположения дефектов в натурном здании с местами в расчетной модели, где достигнуты предельные состояния;
- по данным приборного контроля системы мониторинга, установленной в здании (желательно, измеряющей в контрольных точках деформационные характеристики в виде пространственных перемещений и углов поворота), выполняется последовательная корректировка расчетной модели в ручном или автоматизированном режиме с расчетом параметров напряженно–деформированного состояния конструкций шаговым методом с моделированием деформационных воздействий основания на здание на каждом этапе;
- выполняется комплексный анализ результатов расчетов с целью выявления участков конструкций и их элементов, работающих в предельном состоянии, а также разрабатываются мероприятия по усилению этих элементов и соседних конструкций, в которых происходит перераспределение усилий;
- расчетная модель корректируется введением элементов усиления конструкций, при этом обязательно учитывается характер крепления конструкций усиления к существующим элементам, выполняется перерасчет;
- составляется прогноз дальнейшей работы здания, определяются неблагоприятные ситуации, связанные с развитием деформационных воздействий основания на здание, выявляются участки конструкций и их элементов, напряжения в которых близки к предельным, составляются рекомендации по усилению этих конструкций и дальнейшей безопасной эксплуатации здания.

1.2.2. Требования к построению МКЭ-модели объекта мониторинга.

МКЭ-модель существующего объекта отражает в себе информацию, собранную за время изыскательских работ. Построение МКЭ-модели происходит поэтапно. Базовая МКЭ-модель сооружения формируется на основании анализа имеющейся в наличии проектной документации и данных, полученных в ходе инженерного обследования и геодезических измерений, проведенных на начальном этапе мониторинга, с учетом фактического исходного состояния конструкций сооружения, и накопленных в процессе предшествующей эксплуатации изменений, износа, повреждений и деформаций. Далее, в ходе мониторинга формируется так называемая текущая МКЭ-модель сооружения, которая на каждом последующем этапе актуализируется за счет дополнения новыми данными, характеризующими изменение состояния конструкций сооружения в условиях последующей эксплуатации.

Таким образом, текущая МКЭ-модель носит накопительный характер и служит основой для оценки изменения НДС конструкций сооружения в ходе его жизненного цикла (рис. 3.2).

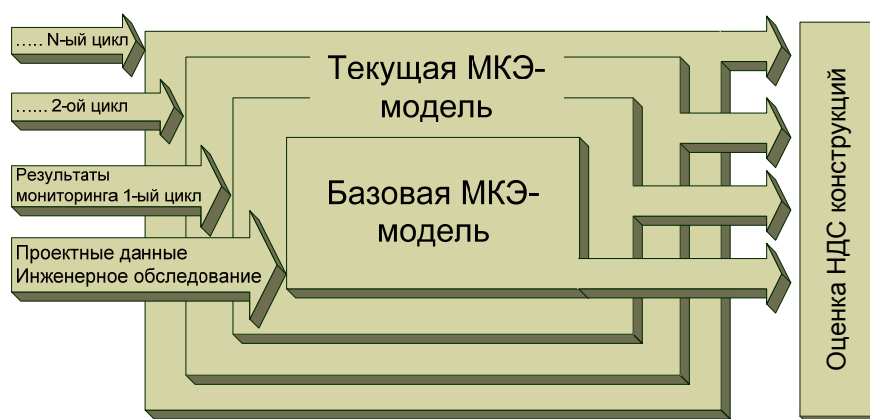


Рис. 3. Текущая МКЭ-модель объекта мониторинга.

МКЭ-модель существующего сооружения должна содержать достаточное количество данных, необходимых для правильного отражения реальной работы сооружения, соответствовать поставленной задаче – оценке НДС конструкций в ходе его мониторинга, должна быть достаточно детальной, но, в то же время, не должна быть перегружена

избыточной информацией, затрудняющей процесс ввода данных, расчета и последующего анализа результатов.

Стоит отметить, что многие факторы, характеризующие фактические условия эксплуатации конструкций, такие, например, как качество изготовления и последующего монтажа, влажность, наличие скрытых дефектов и повреждений, учесть при построении МКЭ-модели на практике достаточно сложно.

Важным аспектом при построении МКЭ-модели является учет одностороннего характера связей конструкций сооружения. Односторонние связи порой могут появляться в расчетной схеме в силу естественных причин (различного рода опирания, грунты и т.д.), а также в силу строительных особенностей и дефектов. Здесь имеются в виду, например, глубокие трещины, непроваренность соединений и т.д.

Существеннейшим фактором являются технические дефекты возведения сооружения, обусловленные несоблюдением проектных решений и технологических норм. Так при неточном устройстве стыков перекрытий появляются эксцентриситеты, которые могут изменять НДС конструкций. В соответствующем научном направлении развивается специальный раздел, который изучает вопросы так называемой теории чувствительности конструкций, включающей вероятностную теорию информации. Теория информации, в свою очередь, учитывает вероятность отклонений исходных данных используемых в расчетной схеме, и в соответствии с этим оценивается надежность достоверности расчета сооружения.

При выявлении в конструкциях дефектов, повреждений, трещин и прогибов, не влияющих на их работоспособность, расчет несущей способности допускается производить по проектным данным.

Ниже представлены основные требования к формированию расчетной МКЭ-модели существующего сооружения, подверженного влиянию неравномерных осадок грунтового основания:

- соответствие базовой МКЭ-модели проектной документации и/или данным предварительного полного обследования:
 - а) геометрические данные (геометрия и конфигурация элементов, схемы сопряжения конструкций);
 - б) физические данные (физико-механические характеристики конструкционных материалов);
 - с) нагрузочные данные (величины и схемы приложения проектных нагрузок);
- соответствие текущей МКЭ-модели результатам мониторинга технического состояния конструкций сооружения на определенном этапе его эксплуатации:
 - а) геометрические данные (отклонения геометрии и конфигурации элементов, схем соединения конструкций);
 - б) физические данные (отклонения и несоответствия физико-механические характеристики конструкционных материалов);
 - с) нагрузочные данные (изменение величины и схемы приложения действующих нагрузок);
 - д) дефектные данные (наличие включений, наличие/возникновение дефектов и повреждений);
- соответствие текущей МКЭ-модели результатам геодезического мониторинга на определенном этапе его эксплуатации:
 - а) пространственные деформации сооружения.

В качестве нагрузок при проведении МКЭ-расчета и анализа НДС конструкций объекта мониторинга от внешнего деформационного воздействия, помимо основных эксплуатационных постоянных и временных нагрузок задаются кинематические воздействия (наложенные перемещения), являющиеся зафиксированными в ходе геодезического

мониторинга перемещениями контролируемых узлов ПК-модели. Результатом такого совместного расчета являются значения внутренних усилий, напряжений и деформаций элементов сооружения от всех видов воздействий, включая наложенные перемещения, определяющие фактическое НДС его конструкций.

1.2.3. Соответствие ПК и МКЭ-моделей.

Анализ НДС конструкций объекта мониторинга производится на основании ввода в текущую МКЭ-модель сооружения данных периодического обследования и значений зафиксированных перемещений контролируемых узлов ПК-модели. Для обеспечения достоверной передачи данных геодезических измерений в МКЭ-систему узлы ПК-модели сооружения с определенной точностью должны соответствовать части узлов МКЭ-модели. Количество контролируемых узлов ПК-модели напрямую зависит от объема и конфигурации сооружения, его архитектурных особенностей, и из технологических требований к координатной геодезической съемки, как правило, составляет 50-100 точек для среднегабаритного сооружения, что на 2-3 порядка ниже количества узлов эффективной МКЭ-модели того же сооружения, исчисляемых десятками тысяч.

ПК-модель представляет собой каркас, сформированный из некоторого количества блоков, граничными узлами которых являются внешние и внутренние узлы ПК-модели. Внешние контролируемые узлы ПК-модели располагаются в наиболее характерных наружных точках сооружения (в местах расположения основных узлов каркаса, в уровнях перекрытий, местах пересечения несущих продольных и поперечных стен, в зонах размещения деформационных швов, в местах сопряжения отдельных частей сооружения и т.д.). Внутренние контролируемые узлы дополняют общую картину вертикальных осадок сооружения. Внутри каждого блока располагаются узлы МКЭ-модели (рис. 4).

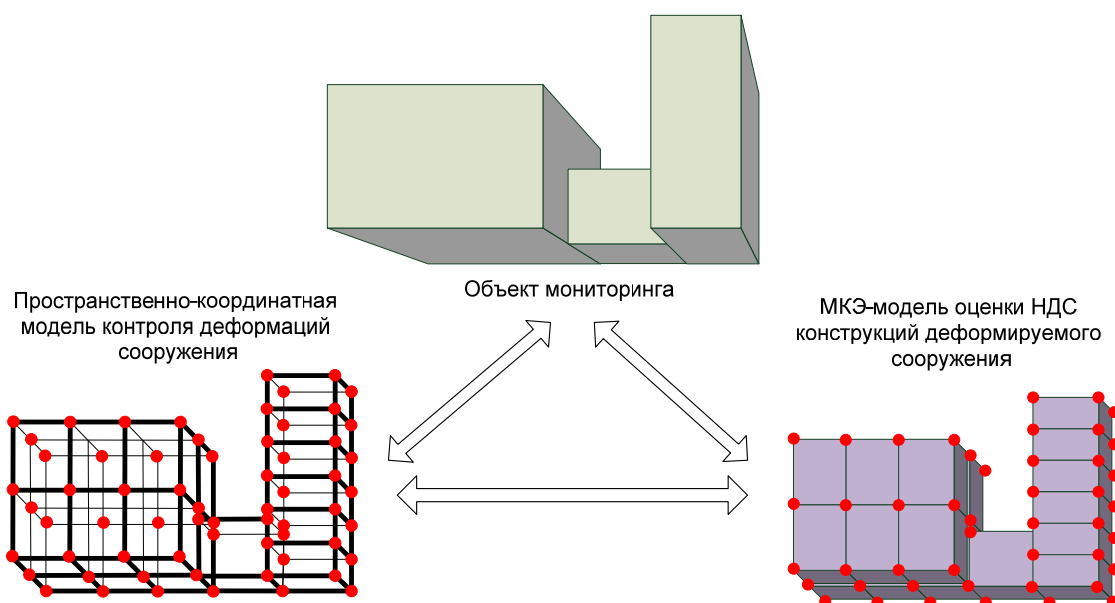


Рис. 4. Соответствие ПК и МКЭ-моделей объекта мониторинга.

Сформированная таким образом контролируемая система, обеспечивающая взаимосвязь ПК и МКЭ-модели, позволяет осуществлять объективный мониторинг НДС конструкций проблемного сооружения по результатам МКЭ-расчета в условиях отсутствия необходимого количества данных о сложном пространственном характере деформирования грунтового основания от незапланированных воздействий (рис. 3.5).

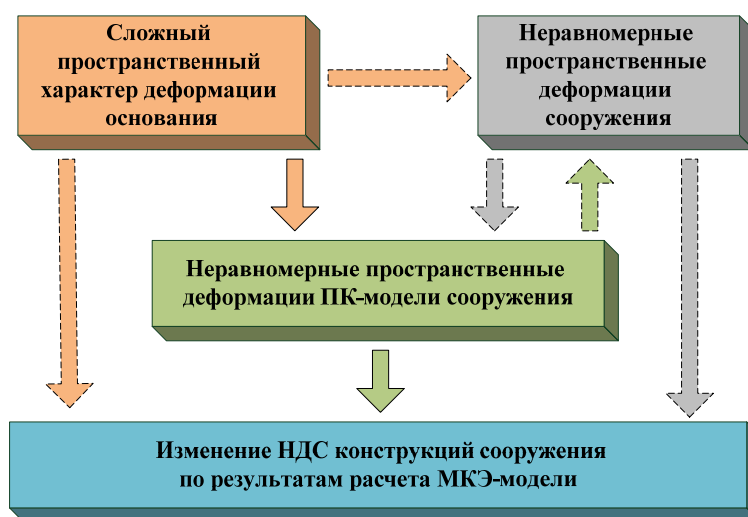


Рис. 5. Схема оценки изменения НДС конструкций объекта мониторинга.

При деформациях основания ПК-модель сооружения частично отражает пространственные деформации, происходящие с конструкциями в

объеме всего сооружения. Соответствующая ей МКЭ-модель, при вводе достоверно составленных нагрузочных данных (наложенные перемещения) позволяет контролировать изменение НДС конструкций и оценивать их фактическую несущую способность при заданных условиях эксплуатации

Лекция 9

1.1. Методы неразрушающего контроля дефектов и повреждений конструкций зданий и сооружений.

В общем виде повреждения зданий и отдельных элементов могут характеризоваться как:

- осадочные, вызванные деформациями оснований фундаментов;
- конструктивные, связанные с особенностями схем зданий, узлов, условиями передачи и перераспределения нагрузок;
- температурно-влажностные, зависящие от технологических режимов изготовления изделий, качества монтажа, соблюдения нормативных требований по содержанию;
- износосвые, связанные с изменением свойств материалов конструкций во времени;
- эксплуатационные, вызванные несоблюдением нормативов и требований по техническому обслуживанию и ремонту (ТО и Р) конструкций.

Отдельно следует учитывать повреждения чрезвычайного характера, вызванные стихийными бедствиями.

Указанные повреждения могут проявляться как самостоятельные, так и в сочетании. Они могут относиться к зданию в целом и к отдельным элементам и даже отдельным участкам конструкций или узлов.

Причинами таких повреждений могут быть:

- ошибки проектирования;
- несоблюдение требований стандартов при изготовлении деталей на заводах;
- низкое качество строительно-монтажных работ;
- длительная эксплуатация, естественное старение материалов и конструкций;

- несоблюдение требований «Правил и норм технической эксплуатации жилищного фонда».

Ниже приведены повреждения строительных конструкций и нарушения нормативно-технических требований (внешние признаки эксплуатационной пригодности), которые несут непосредственную угрозу жизни, здоровью и имуществу граждан, устранение которых требует проведения неотложных ремонтно–восстановительных работ, капитального ремонта или прекращения эксплуатации здания:

- массовые прогрессирующие сквозные трещины на всю высоту здания;
- искривление горизонтальных линий стен;
- осадка отдельных участков здания;
- выпирания грунта и разрушение стен подвала;
- сквозные трещины в межоконных поясах, перемычках, простенках несущих стен, панелях, столбах с раскрытием более 5 мм;
- вывалы кладки;
- трещины, сдвиги в сопряжениях перекрытий, лестниц.

Поиск дефектов и повреждений бетона, а также металлических и железобетонных конструкций осуществляют с помощью следующих методов:

- акустические (ультразвуковые и более низких частот);
- магнитные, электромагнитные и электрические;
- при помощи ионизирующих излучений (рентгеновские, радиоизотопные и др.);
- радиодефектоскопия и инфракрасная дефектоскопия.

Акустические методы

Основаны на возбуждении упругих механических колебаний. По параметрам этих колебаний и условиям их распространения судят о физико–механических характеристиках и состоянии исследуемого материала.

В зависимости от частоты колебаний акустические методы делятся на ультразвуковые (при частотах от 20 тыс. Гц и выше) и методы, основанные на использовании колебаний звуковой (до 20 тыс. Гц) и инфразвуковой (до 20 Гц) частот.

Ультразвуковые волны, переходя из одной среды в другую, преломляются, а также отражаются от граней, разделяющих эти среды, что используется для определения их распространения при данном методе контроля. В воздушных прослойках ультразвуковые колебания затухают почти полностью, что позволяет выявлять и исследовать скрытые внутренние дефекты: трещины, расслоения, пустоты и т.д.

Современные приборы: TDR-2, АЭ "DISP", АЭ "РОСКЕТАЕ-2", АЭ "РАДИОКАНАЛ".

Магнитные, электрические и электромагнитные методы

Сущность метода заключается в том, что магнитный поток, проходящий в металле и пересекающий трещину или иной дефект, встречает большое магнитное сопротивление в виде прослойки воздуха или неферромагнитного включения, а силовые линии, искривляясь, выходят на поверхность, что обуславливает возникновение местных потоков рассеяния.

Современные приборы: PosiPen, Positest F/G, Магнитометр ИМАГ–400Ц, дефектоскоп МД–7, портативное намагничивающее устройство МД–4К.

Методы, основанные на использовании ионизирующего излучения

В настоящее время в строительстве широко применяют контроль рентгеновскими и гамма–излучениями для оценки физико–механических характеристик материалов и качества продукции. При определении влажности материала оказывается целесообразным использование потока нейтронов.

Преимуществом применения ионизирующих излучений является возможность быстрого и четкого получения определяемых характеристик. Работа с соответствующей аппаратурой хотя и не сложна, но требует наличия

подготовленного для этой цели персонала. Необходимо также тщательное соблюдение требований техники безопасности во избежание вредного влияния ионизирующих излучений на организм человека.

Наиболее важные направления для исследования дефектов в металлических конструкциях следующие:

- дефектоскопия сварных соединений;
- определение напряженного состояния металла.

Современные приборы: рентгеновский аппарат Site-X, применяемый для просвечивания объектов на предмет обнаружения скрытых дефектов, комплекс цифровой радиографии ЦР-8.

Радиодефектоскопия и инфракрасная дефектоскопия

Применение радиоволновых излучений эффективно при контроле пластмасс, древесины (в том числе и в клееных конструкциях), бетона, железобетона и других материалов. Радиоволновой метод дает возможность исследовать как начальную стадию зарождения очагов нарушения сплошности, так и ход дальнейшего развития дефектов.

В тепловых методах регистрируются:

1. инфракрасное излучение от внешнего источника, отраженное от исследуемого материала или прошедшее сквозь него;
2. местные отклонения собственных инфракрасных излучений поверхности проверяемого элемента, нагретого, например, пропуском тока через электропроводящие материалы.

Местные нарушения картины температурного поля являются чувствительными показателями наличия дефектов, в том числе и скрытых, не выявляемых при применении других методов контроля.

Современные приборы: радиоволновой бетоноскоп Conquest, микроволной уровнемер MRG 10, тепловизор ThermaCAM E45, тепловизор InfraCam.

Из перечисленных выше неразрушающих методов контроля железобетонных конструкций наиболее пригодными являются метод УЗК и

акустической эмиссии. Так как они наиболее достоверные, оперативные, мобильные, а также позволяют проводить массовый контроль с минимальными трудозатратами.

Следует подчеркнуть, что особо эффективным при неразрушающих методах контроля является комплексное применение различных методов, базирующихся на разных физических принципах, взаимно контролирующих и дополняющих друг друга.

1.2. МКЭ-оценка НДС конструкций эксплуатируемых сооружений в ходе их мониторинга с учетом наличия дефектов.

Основные этапы моделирования дефектов и повреждений в МКЭ–модели конструкции:

1. Обнаружение и установление типа повреждения, его геометрических параметров (длина, глубина, ширина, форма и т.д.), а также свойства конструкционного материала. В качестве примера рассмотрим трещины (Рис. 1,2).



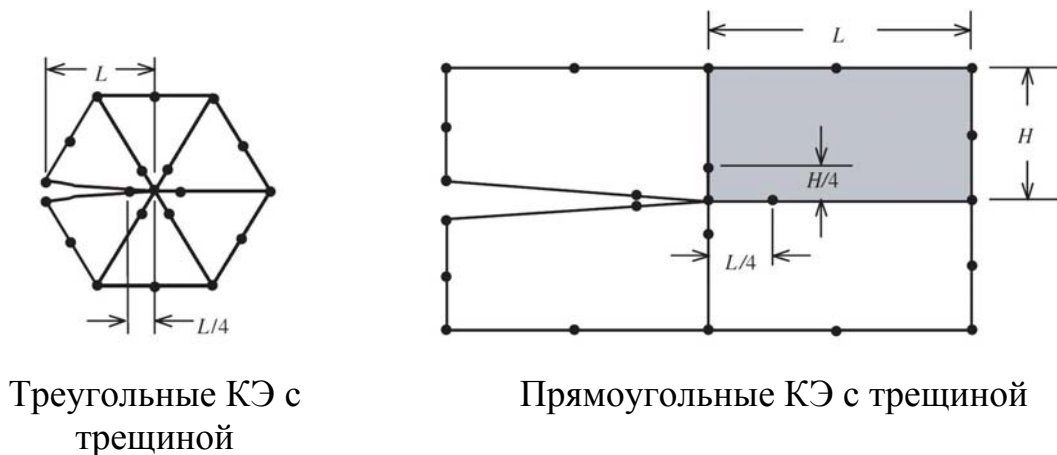
Рис. 1. Общий вид трещины



Рис. 2. Определение толщины трещины

2. Подбор адекватного типа специальных конечных элементов (КЭ). В настоящее время большинство программных комплексов не позволяют проводить МКЭ–моделирование влияния дефектов типа трещин на несущую способность конструкций сооружений. Только такие мощные программные комплексы, как ANSYS, ABAQUS имеют библиотеки специальных КЭ,

позволяющих проводить подобный анализ. При этом из данных библиотек следует корректно подбирать те КЭ, которые отражают реальные условия образования и развития трещины. (Рис. 3)



Треугольные КЭ с трещиной

Прямоугольные КЭ с трещиной

Рис. 3. Типы КЭ с дефектами

3. Установка критериев разрушения, в соответствии с которыми будет происходить дальнейшее развитие трещины. Причем в качестве критерия используются величина или комбинация величин, измеряемых экспериментально. В критерий могут входить и параметры концентратора напряжений, например его характерный размер, которые сравниваются с соответствующими им расчетными характеристиками.

4. Интеграция КЭ с заданными параметрами в МКЭ–модель конструкции сооружения, сформированную по результатам обследования и проектной документации и полный перерасчет модели на заданные эксплуатационные нагрузки.

5. Формирование выводов о техническом состоянии сооружения на основании полученных данных об НДС конструкций, возможности его дальнейшей эксплуатации, или необходимости проведения ремонтных работ.

В настоящее время существует более сотни программных комплексов, в той или иной степени ориентированных на расчет конструкций. Всех их объединяет реализация МКЭ в перемещениях. Это говорит о том, что ещё не найдена действенная альтернатива МКЭ в перемещениях, хотя этот подход

имеет некоторые недостатки, и эйфория характерная для первых этапов развития МКЭ уже давно прошла.

На сегодняшний день, лишь малая доля программных комплексов имеет возможность моделирования дефектов и повреждений в МКЭ–модели. К ним относятся такие ПК, как ANSYS, MSC/NASTRAN, ABAQUS, а также отечественный ПК Лира 9.6.

Так, например, в ПК MSC/NASTRAN присутствуют стандартные конечные элементы для описания трещин. Двухмерный элемент с трещиной CRAC2D используется для моделирования оболочки, имеющей нарушение сплошности в виде трещины.

Схема элемента показана на рисунке 4

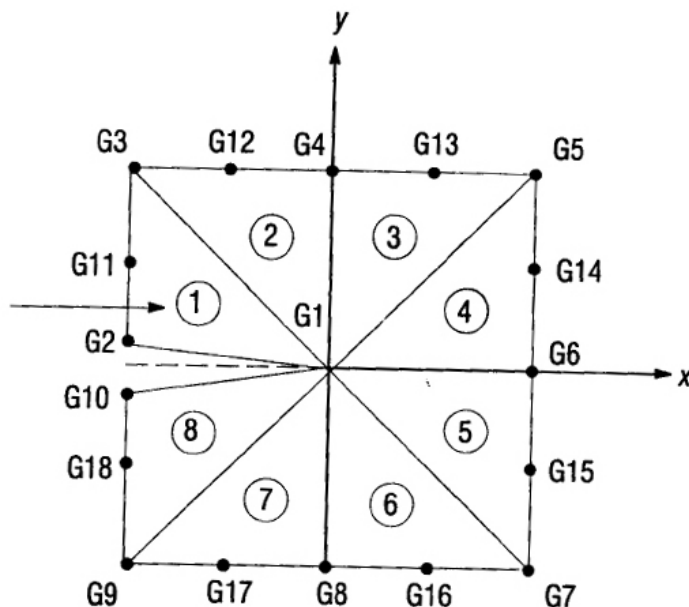


Рис. 4 G1–G18 – узловые точки элемента, 1–8 – сектора конечного элемента.

Необходимо задавать узловые точки с 1 по 10, точки с 11 по 18 не являются обязательными. Элемент может работать как в плосконапряженном, так и в плоско–деформированном состоянии.

Трехмерный элемент с трещиной CRAC3D используется для моделирования объемных тел, имеющих нарушения сплошности в виде трещины.

Схема элемента показана на рисунке 5.

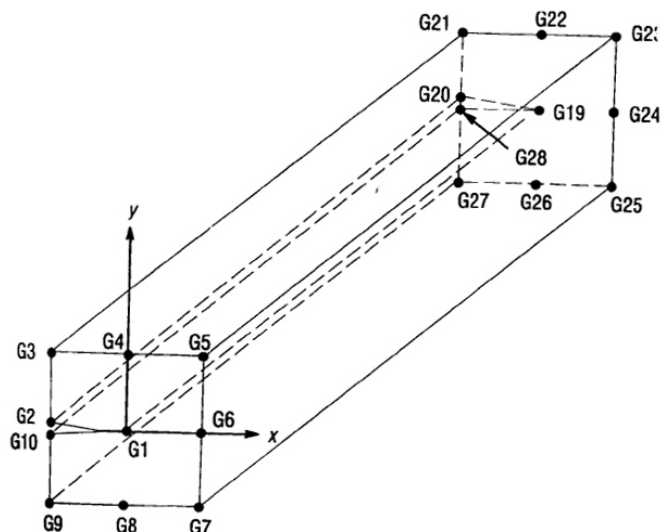


Рис. 5. G1–G28 – узловые точки элемента.

В новой версии ПК Ли́ра 9.6 разработчики добавили следующие функции:

- учет неравномерных осадок вертикальных элементов, обусловленных неравномерными свойствами грунта, неравномерными осадками колонн и диафрагм и другими факторами;
- учет дополнительных эксцентриситетов от крена здания, нелинейные эффекты;
- учет начальных дефектов, бетона с трещинами в линейноупругой и физнелинейной постановках;

Таким образом, существует возможность моделировать тот или иной дефект используя основы моделирования и конечные элементы имитирующие дефект. Однако возникает ряд проблем:

- как правильно моделировать дефект или повреждение?
- какие использовать конечные элементы?
- как правильно вписать моделируемый дефект в модель всего здания или сооружения?

На помощь пользователю приходят специальные приложения к программным комплексам, которые значительно упрощают процесс моделирования и делают это максимально адекватно работе реальной

конструкции с дефектом, так как на их создание и разработку потрачено несколько лет. Примером такого специального приложения является FEACrack, которое ориентировано на такие ПК, как ANSYS, Warp3D, ABAQUS.

Программный комплекс FEACrack разработан для создания трехмерных КЭ-моделей трещин произвольной формы. FEACrack использует сетки из элементов гексаэдрической формы для описания объема и формы трещины в конструкции. FEACrack разработана экспертами в области Механики Разрушения, которые сами являются конечными пользователями. Не обязательно быть специалистом в сфере конечно-элементного анализа, чтобы использовать FEACrack. Интуитивный и удобный интерфейс поможет постепенно пройти через создание модели, анализ, и постобработку результатов.

Трехмерная КЭ модель трещины генерируется отдельно от основной сетки и соединяется с ней посредством неразрывного типа контакта.

Интенсивность напряжений вычисляется на основе результатов решения ANSYS, Warp3D или ABAQUS во время постпроцессинга.

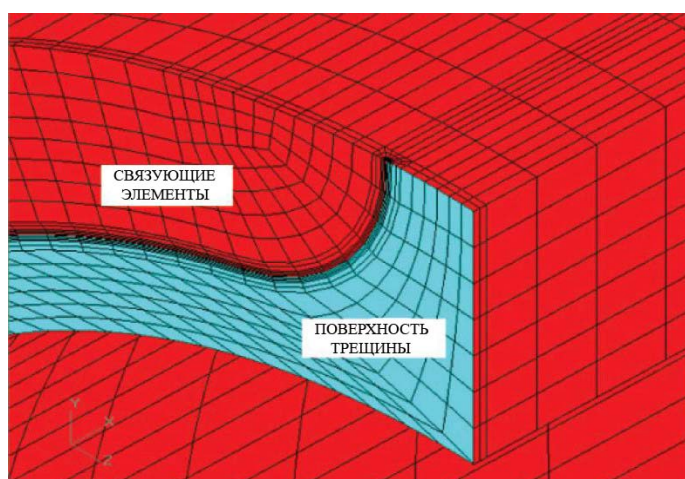


Рис. 6. Простая 3D сетка трещины

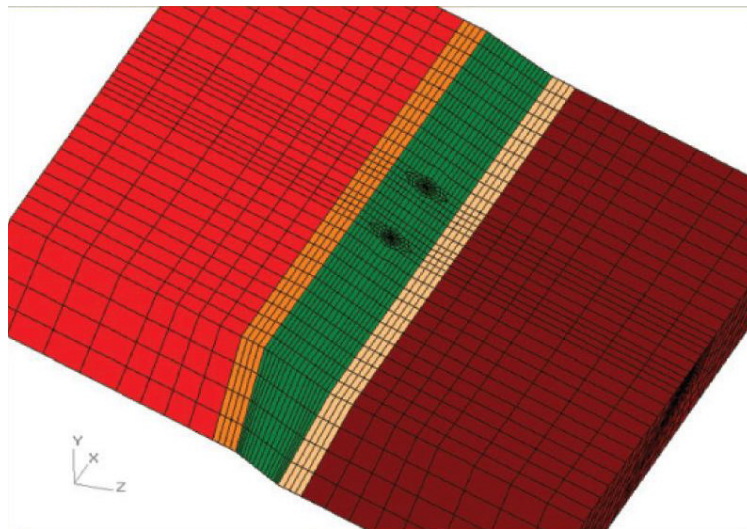


Рис. 7. Модель трещин в сварке со свойствами составных материалов, воздействие тепла и смещение сварки

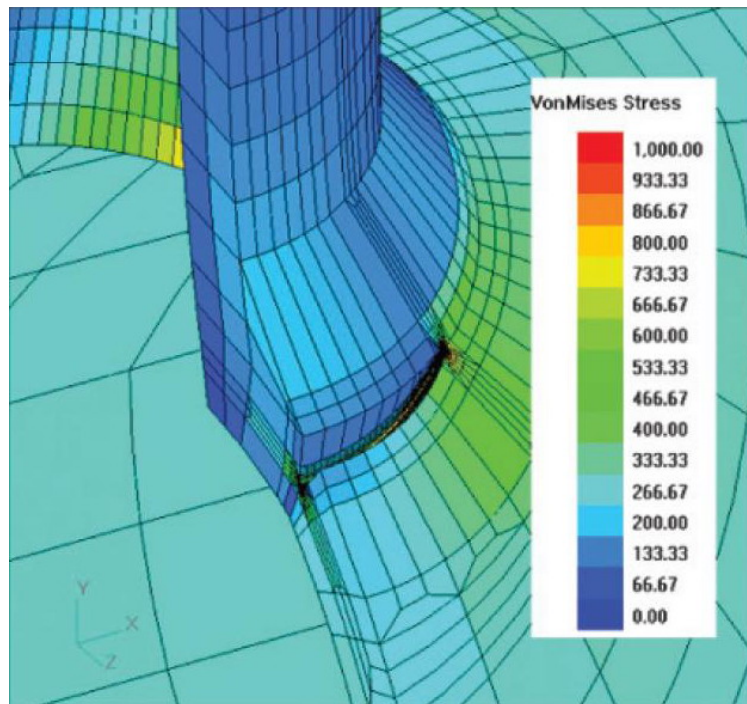


Рис. 8. Постобработка результатов непосредственно в FEACrack

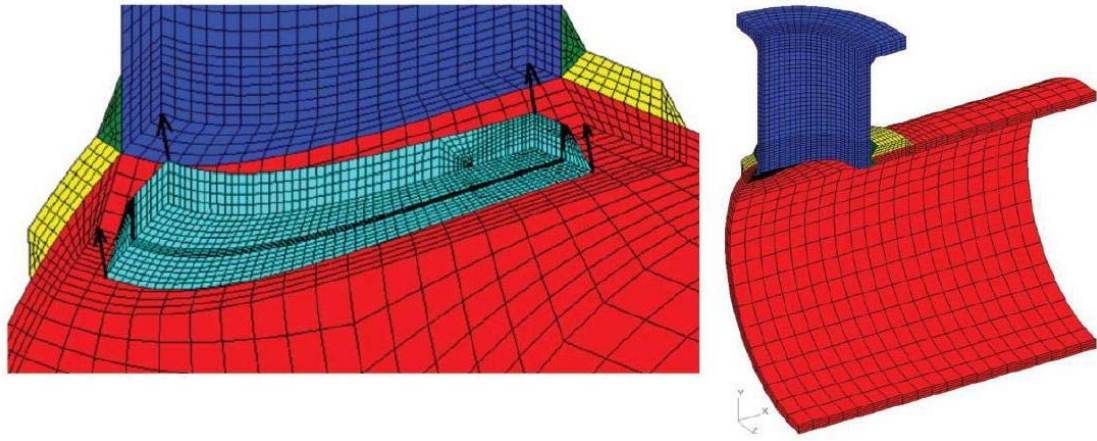


Рис. 9. Передовой анализ позволяет пользователю размещать 3D сетку трещины в любом месте модели

Ниже представлена схема работы с программой FEACrack:

1. создайте входные файлы с помощью ABAQUS, ANSYS или Warp3D;
2. импортируйте и обработайте результаты в ABAQUS, ANSYS или Warp3D со следующими опциями:
 - J-интеграл и график интенсивности напряжений K;
 - полученные величины J и K вместе с маршрутом зависимости J;
 - K – смещение, если использована стандартная сетка;
 - масштабирование смещения;
 - просмотр результата с точки зрения: напряжений по Мизесу, усилий, смещений и т.д.;
 - выбор графика напряжений.
3. выполните детальный усталостный анализ со следующими характеристиками:
 - переменное нагружение;
 - разнообразные уравнения роста усталости;
 - прирост параметров роста:
 - конечный размер, начальный размер;
 - количество циклов, количество шагов.

- аппроксимация кривой и сглаживание результатов K ;
 - интерполяция напряжений на каждом шаге анализа.
4. выберите расширенную библиотеку гибких свойств материалов и конститутивных моделей пластичности;
 5. опустите вниз меню с выбранными граничными условиями;
 6. проанализируйте сетку трещины как субмодель;
 7. запустите и контролируйте анализ через внутренний файловый контроллер.

То, что обычно занимало дни и недели, сейчас занимает всего несколько часов. FEACrack позволяет анализировать 3D трещины в любых моделях начиная от твердотопливного ракетного двигателя, и заканчивая термоядерным реактором.

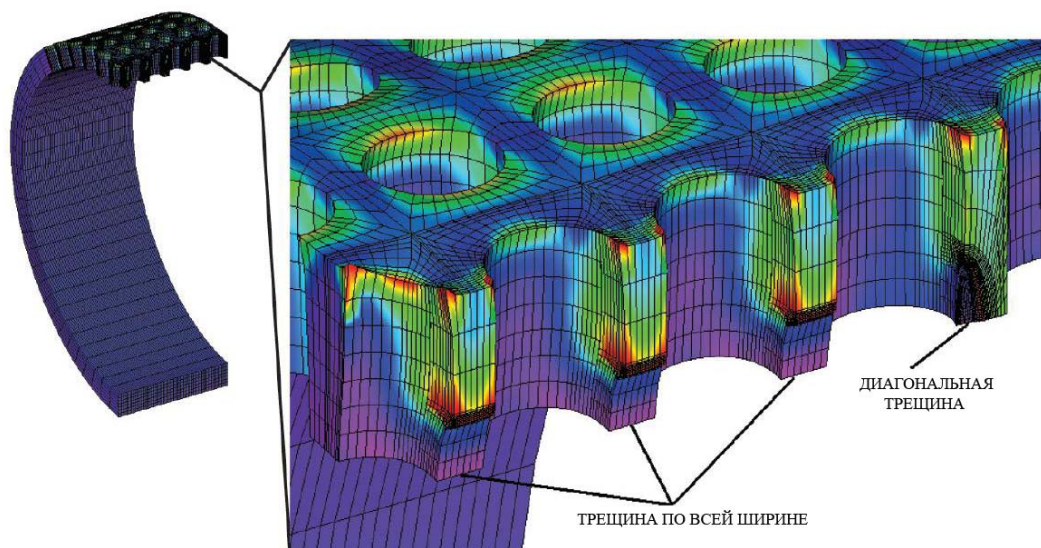


Рис. 10. Связки с трещинами вдоль барабанов на Американской Электростанции.

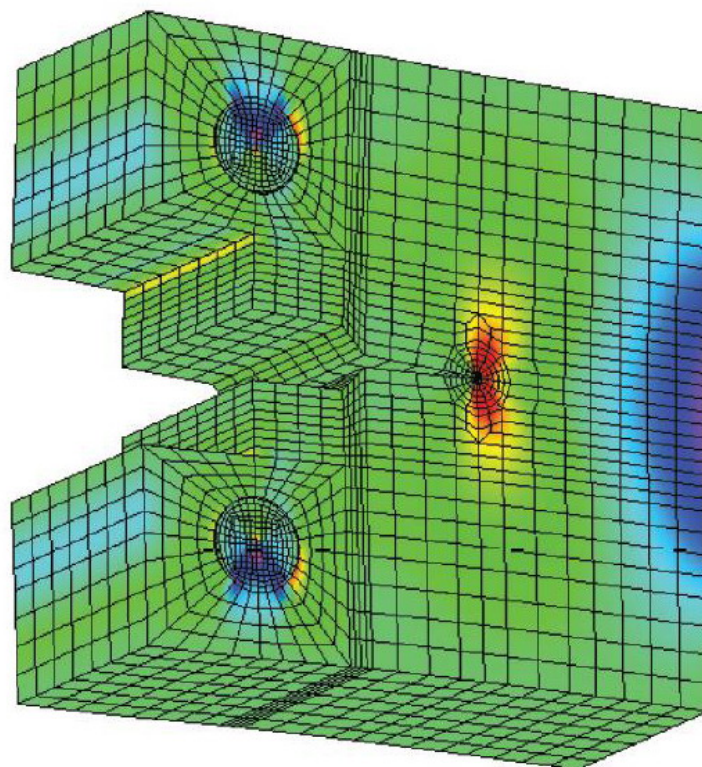


Рис. 11. Компактный образец напряжений, использованный для калибровки материалов.

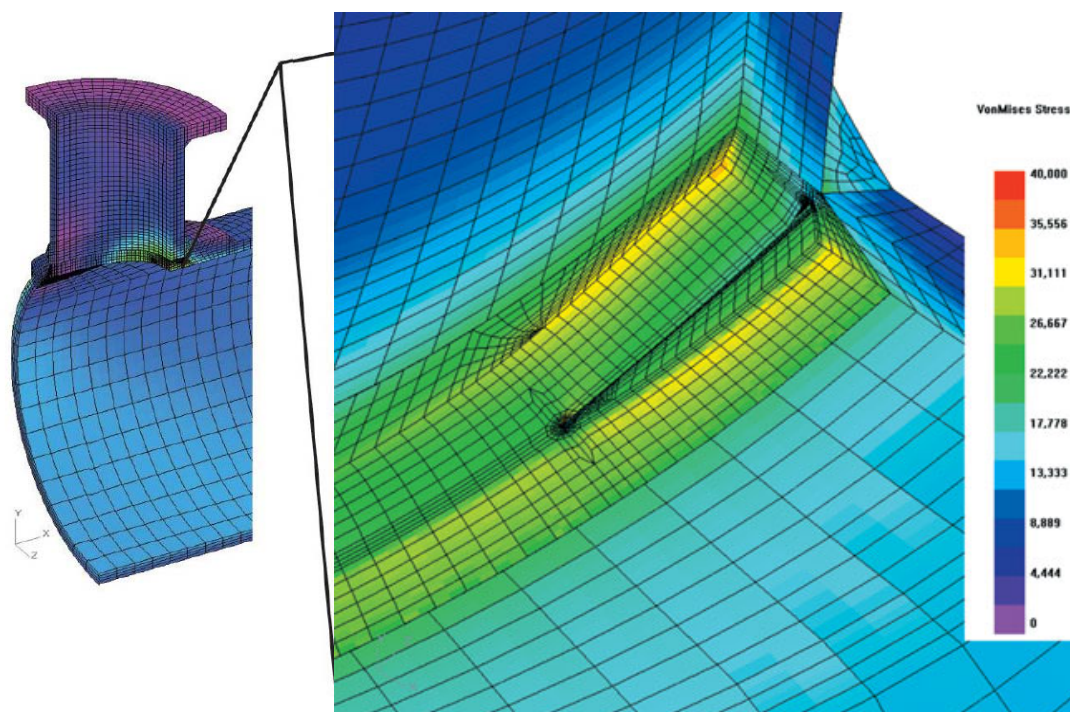


Рис. 12. Зарождение поверхностной трещины от действующей нагрузки в виде давления и остаточных напряжений в сварном шве.

Программный комплекс FEACrack имеет обширную библиотеку моделей дефектов, например:

- полу–эллиптические, постоянной глубины и поверхностные трещины в углах;
- симметричные и несимметричные скрытые трещины;
- трещины, проходящие насквозь или по краю;
- поверхностная трещина по всей ширине конструкции;

Также у пользователя есть возможность задать собственные параметры трещины, которых нет в библиотеке.

Таким образом, с течением времени совершенствование компьютерных технологий и методик обследования позволяют проводить оценку технического состояния несущих конструкций зданий и сооружений адекватней по отношению к реальной работе конструкции. С помощью МКЭ–анализа можно выявить зоны повышенного напряженно–деформируемого состояния, в которых в будущем возможно возникновение дефекта или разрушения. Своевременно проведенный ремонт и усиление несущих конструкций зданий и сооружений снижают риск возникновения дефектов и, следовательно, повышает безопасность эксплуатации.

Лекция 10

Мониторинг зданий и сооружений, подверженных динамическим воздействиям.

Инструментальное исследование колебаний строительных конструкций. Цели и задачи.

Основные задачи. Виброизмерительное оборудование.

Результаты инструментальных как экспериментальных, так и натуральных исследований колебаний конструкций являются важным и надежным источником информации о характере и уровне колебаний, динамических характеристиках конструкций, характере воздействий и т.д. Во многих случаях эта информация достаточна не только для оценки уровня колебаний, но и для разработки мероприятий по его снижению. Основными целями и результатами подобных исследований, как правило, являются:

- оценка существующих колебаний с точки зрения прочности несущих конструкций, санитарно-гигиенических норм, из условий нормальной работы технологического оборудования и ограничения вибраций, передающихся на соседние здания;

- определение основных источников колебаний и факторов, влияющих на уровень колебаний (возникновение резонансных колебаний и т.п.);

- разработка, в случае необходимости, виброзащитных мероприятий и оценка их эффективности.

В процессе инструментальных обследований возникает ряд задач, наиболее важными из которых следует считать:

- определение уровня и характера колебаний конструкций, и, при необходимости, поверхности грунта: перемещений, скоростей или ускорений (линейных или угловых) в реальном времени; их пиковых значений и спектрального состава;

- определение динамических характеристик зданий и элементов конструкций совместно с установленным оборудованием (частот и форм колебаний); уточнение конструктивных и расчетных схем; эти данные важны при разработке мероприятий по снижению уровня вибраций, при реконструкции зданий, замене оборудования и т.п.;

- выявление источников, вызывающих колебания сооружений и грунта, и, по возможности, оценка величины и характера динамических нагрузок.

Процесс измерения вибрации включает, как правило, три стадии:

1. Преобразование измеряемой физической величины в другую физическую величину, более удобную для измерений и регистрации и называемую вторичной.

В механических приборах изучаемое перемещение конструкции преобразуется в перемещение одного элемента относительно другого (стрелки относительно шкалы, пера-ленты и т.п.). В электрических приборах измеряемая механическая величина преобразуется в электрическую. Прибор или часть прибора, в которых это преобразование реализуется, называется

датчиком, сейсмоприемником, вибродатчиком или первичным измерительным вибропреобразователем.

2. Измерение вторичной физической величины.

3. Регистрация результатов измерения.

Часто прямые результаты измерений не являются достаточными. Для окончательных выводов может потребоваться проведение дополнительной обработки обследования – гармонического, спектрального анализа и т.п.

При выборе методики измерения и аппаратуры существенным является:

- амплитудный диапазон вибраций, который может составлять от нескольких микрон (при установке прецизионного оборудования) до нескольких метров (у высоких башен и труб);

- частотный спектр – от долей Гц у высоких гибких сооружений до сотен Гц у жестких конструкций;

- характер колебаний (периодические, затухающие, биения, случайные), определяемые видом воздействий – от машин и оборудования, при движении транспорта (железнодорожного, автомобильного, поездов метрополитена), при действии ветра и т.п.;

- требования к регистрации колебаний и хранению полученной информации (на бумажной или магнитной ленте, непосредственно на стрелочном или цифровом приборе);

- выбор необходимого количества точек одновременной регистрации колебаний (от одной – при оценке максимального уровня в какой-либо конкретной области до десятков – при изучении форм колебаний сложных конструкций).

В зависимости от целей исследований и требований к характеру получаемой информации могут использоваться комплекты аппаратуры нескольких типов.

В комплекты, предназначенные для измерения и регистрации вибраций (перемещений, скоростей или ускорений) в реальном времени, как правило, входят датчики (вибродатчики, сейсмоприемники и т.п.) и регистрирующие устройства.

Распространены два типа вибродатчиков (вибропреобразователей) для измерения кинематических параметров вибраций – датчики с индукционными преобразователями (сейсмоприемники) и датчики с пьезоэлектрическими преобразователями. Датчики первого типа содержат инерционную массу и индукционный элемент, включающий постоянный магнит и электрическую катушку. При движении массы относительно корпуса изменяется магнитный поток через катушку, в результате чего в ней вырабатывается электродвижущая сила (ЭДС), пропорциональная скорости изменения магнитного потока и соответственно скорости движения. Такие датчики имеют низкие собственные частоты и работают в зарезонансном (виброизолированном) режиме. С их помощью можно измерять перемещения конструкций в диапазоне частот от долей до сотен Гц.

Принципиальная схема вибродатчика с индукционным преобразователем показана на рис. 6.2. на примере датчика ВЭГИК,

разработанного в 70-е годы в Институте Физики Земли (ИФЗ). В настоящее время используются более совершенные по своим характеристикам и, часто меньшие по размерам и весу, датчики И-001; И-002; СМ-3 и др.

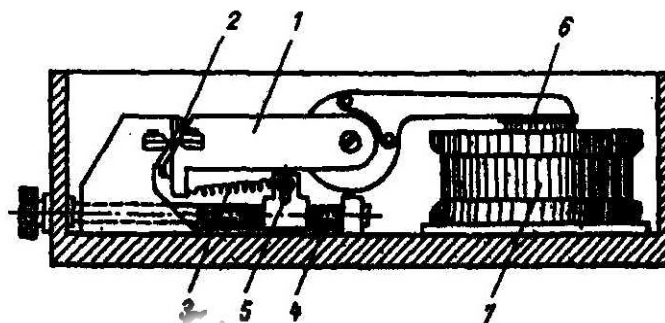


Рис. 6.1. Вибродатчик ВЭГИК:

1- маятник с сейсмомассой; 2 – крестовые шарниры; 3 – пружины; 4,5 – регулировочные винты; 6,7 – индукционная система (6 – катушка, 7 – магнитная система)
2-

Пьезоэлектрические преобразователи основаны на использовании так называемого «прямого пьезоэффекта» - свойства некоторых материалов (в частности кварца) поляризоваться под действием механической силы. Такие элементы широко используются в датчиках ускорения, где они одновременно выполняют роль упругого элемента механической системы. Эти датчики имеют высокие собственные частоты (от сотен Гц) и работают в дорезонансном режиме. Частотный диапазон датчика указывается в паспортных данных.

Возможная общая компоновка датчиков такого типа показана на рис. 6.2.

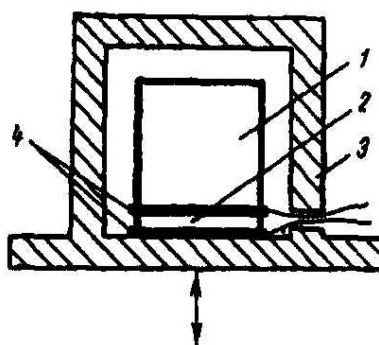


Рис. 6.2. Конструктивная схема пьезоакселерометра:

1- сейсмамаасса; 2 – пьезоэлемент, 3 - корпус, 4- обкладки
2-

Для измерения переменных деформаций, напряжений или усилий используются тензорезисторы или приборы, в которых с помощью тензорезисторов измеряются деформации чувствительных элементов (например, мембран в датчиках давления).

В качестве регистрирующих устройств при экспериментальных исследования колебаний применяются:

- светолучевые и электронно-лучевые осциллографы;
- быстродействующие самопишущие приборы и самописцы уровня;

- магнитографы-аппараты для точной записи измерительной информации на магнитный носитель и ее воспроизведения в виде электрических сигналов.

В светолучевых осциллографах электрический сигнал от датчика или усилителя преобразуется в движение светового луча, с помощью которого колебательный процесс регистрируется на движущейся светочувствительной бумажной ленте. Скорость протяжки ленты устанавливается в зависимости от частотного состава вибраций. Светолучевые осциллографы используются для регистрации низкочастотных колебаний (до 100 Гц) каркасов зданий, элементов несущих конструкций и фундаментов.

При регистрации одного-шести периодических или относительно кратковременных процессов могут использоваться электронно-лучевые осциллографы. Они позволяют осуществлять визуальное наблюдение процесса и сохранять изображения от однократного сигнала в течение длительного периода времени, исчисляемого минутами, часами, а при некоторых условиях даже неделями.

Для регистрации низкочастотных процессов (от 0 до 100 Гц) в одной или двух зонах удобно использовать быстродействующие самопишущие приборы (БСП), позволяющие получить видимую запись процесса непосредственно на бумажной ленте. Наиболее удобны легкие одноканальные БСП, которые могут использоваться в комплекте с индукционными датчиками. Амплитудно-частотная характеристика такой системы имеет в рабочем диапазоне (до 100 Гц) линейный участок, что обеспечивает неискаженную регистрацию скорости. При записи перемещений применяется интегрирующий контур, помещаемый между датчиком и усилителем.

В отличие от БСП самописцы уровня регистрируют не сам колебательный процесс, а изменение во времени его среднеквадратического (эффективного) значения.

Самописцы уровня обычно используются для регистрации достаточно длительных процессов (при оценке выносливости конструкций, проверке вибрации рабочих мест и т.п.).

Для регистрации, анализа колебаний и их оценки с точки зрения физиологического воздействия на людей и влияния на технологические процессы используют комплекты аппаратуры, в частности, виброметр типа ОКТАВА 101В, предназначенные для измерения среднеквадратичных, эквивалентных и пиковых уровней виброускорений.

Виброметр, как правило, включает в себя: измерительно-индикаторный блок (ИИБ); вибропреобразователь со встроенным антивибрационным кабелем; блок питания (зарядное устройство). В состав виброметров включены октавные, треть-октавные и корректирующие фильтры.

Общий вид шкалы виброметра показан на рис. 6.3.

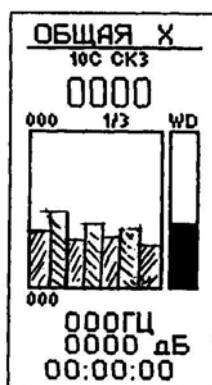


Рис. 6.3. Изображение спектра.

1/1-октавы - 7 полос, 1,2,4,8,16,31.5,63 Гц

1/3-октавы – 0.8,1,1.25,1.6,2,2.5,3.15,4,5,6.3,8,10,12.5,16,20,25,31.5,40,50,63,80 Гц

Справа – столбик, соответствующий скорректированному уровню (вверху крупным шрифтом)

Однако наиболее полная информация о характере и уровне колебаний может быть получена с помощью комплектов, которые включают в себя, в том числе, магнитографы (аппараты для точной записи измерительной информации на магнитный носитель) и персональные компьютеры (типа ноутбук) с блоком многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Важными преимуществами такого способа записи (по сравнению с записями с помощью осциллографов или БСП) являются возможности: многократного воспроизведения электрического аналога сигнала; регистрации длительных процессов в различных режимах; анализа и обработки записей и использование весьма совершенной аппаратуры и специальных программ, в том числе, программ для вычисления спектральной плотности по схеме быстрого преобразования Фурье. Такие комплекты в последнее время получают все большее распространение.

Методика проведения и анализ результатов инструментальных исследований колебаний.

Инструментальные исследования колебаний строительных конструкций целесообразно проводить в несколько этапов.

На первом этапе следует ознакомиться с наличием виброактивного и виброчувствительного оборудования, конструктивными решениями зданий, провести визуальный осмотр конструкций, в частности, в соответствии с табл. 4.4.

После выбора основных зон, где возможно неблагоприятное воздействие вибрации, целесообразно провести предварительное обследование. На этом этапе удобно воспользоваться быстродействующими самопишущими приборами (БСП), с помощью которых можно достаточно быстро выявить характер и уровень колебаний. Во многих случаях (особенно при колебаниях, близких к гармоническим) эта информация

оказывается достаточной для оценки колебаний. В том числе в соответствии с существующими нормативными документами, и разработки виброзащитных мероприятий.

Далее. Если это необходимо, по результатам предварительного обследования составляется программа дальнейших исследований, целями которых может быть более детальное и точное определение параметров колебаний (спектра, средних значений смещений, скоростей и ускорений), форм колебаний и т.п. Более детальные виброизмерительные работы могут включать также подробное изучение вибраций, их уровня, характера распространения по конструкции при рабочих и пуско-остановочных режимах или специальном возбуждении вразличное время суток, а иногда в различные сезоны. Следует оценить эффективность виброзащитных мероприятий, если они были выполнены по результатам предварительных обследований. В процессе измерений должны делаться соответствующие записи и комментарии, которые поясняют результаты испытаний.

При анализе результатов инструментального обследования следует иметь в виду, что в большинстве случаев повышенный уровень вибрации связан с возбуждением резонансных или околорезонансных режимов. В связи с этим определение частот собственных колебаний при ударном возбуждении или по резонансным пикам в пуско-остановочном режиме является необходимым этапом при проведении испытаний. По записям свободных колебаний определяются также параметры затухания (логарифмический декремент колебаний).

Характер информации, которую получают в результате измерения, регистрации и обработки результатов исследования, зависит от типа комплекта аппаратуры (оборудования). Записи перемещений, полученные с помощью одноканальных самописцев, в реальном времени показаны на рис. 6.4. – 6.7. На рис. 6.4. приведены записи гармонических колебаний перекрытий, возбуждаемых при работе грохотов с числом оборотов 735 об/мин. На рис. 6.5. показаны характерные записи свободных колебаний, возбуждаемых при ударе по конструкции или при работе машин ударного действия. Колебания типа биений имеют вид, показанный на рис. 6.6. Такие колебания возбуждаются при работе нескольких машин с близкими частотами возмущающих сил, а также при колебаниях поверхности грунта и конструкций при прохождении вагонов с близкими значениями частот собственных колебаний.

Вид бигармонических колебаний, в частности возбуждаемых при работе поршневых компрессоров, дан на рис. 6.7.

На рис. 6.8, 6.9 приведены записи скоростей колебаний в реальном времени и их спектры, полученные после обработки результатов обследования колебаний элементов перекрытий в зданиях универсама «Детский мир» (в торговом зале) и ОАО «Реатекс». Основным источником колебаний в первом случае является движущийся по примыкающим улицам автотранспорт. Преобладающие частоты – частоты собственных вертикальных колебаний перекрытий. На спектре скоростей колебаний

перекрытия в одном из пролетов второго этажа административного здания ОАО «Реатекс» четко выделена частота вынужденных колебаний 16 Гц (рис. 6.9.), возбуждаемых при работе угловых компрессоров, расположенных на расстоянии нескольких сот метров от здания.

Первая частота собственных колебаний в этом нетиповом пролете практически совпадает с частотой вынужденных. Что и явилось основной причиной повышенного уровня вибраций.

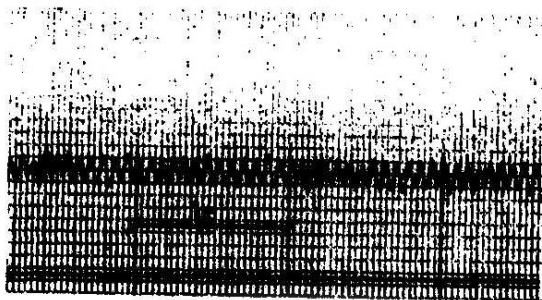


Рис. 6.4.

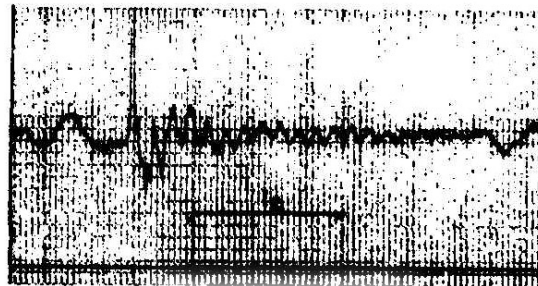


Рис. 6.5

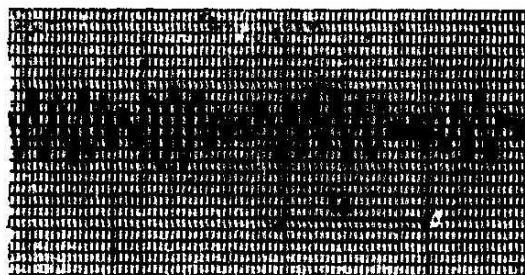


Рис. 6.6.

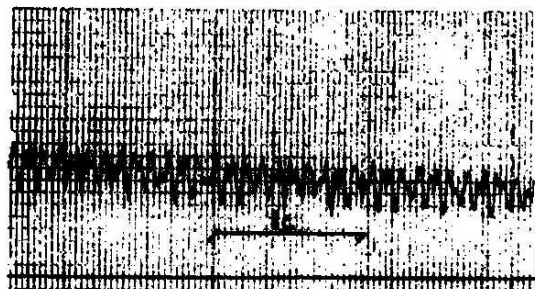


Рис. 6.7.

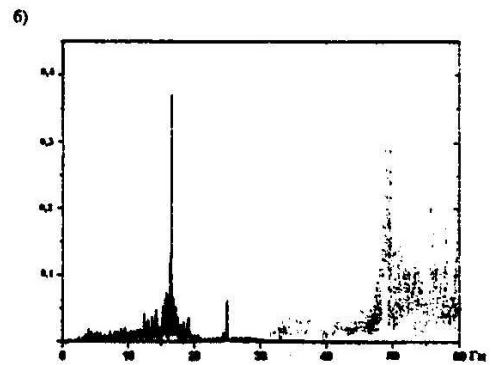
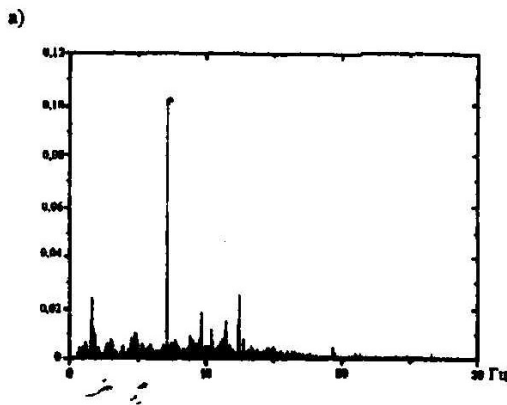
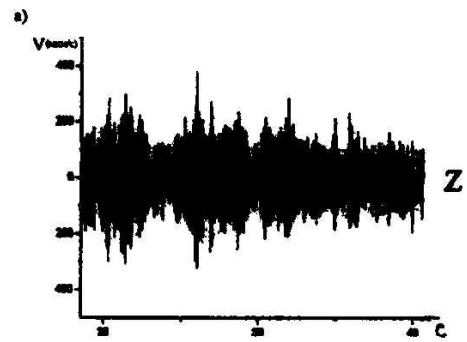
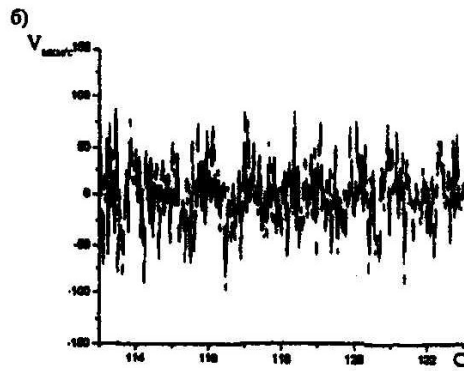


Рис. 6.8. а – скорость (мкм/с)
(мкм/с)
б - спектр скоростей

Рис. 6.9. а – скорость колебаний
б – спектр скоростей

Общие рекомендации по обследованию зданий и сооружений, подвергающихся динамическим воздействиям, при их эксплуатации и реконструкции. Некоторые характерные ошибки при выборе конструктивных решений.

Выявление вибрационных повреждений в процессе эксплуатации зданий. Подвергающихся динамическим воздействиям. Является относительно простой. Хотя и весьма важной процедурой, которая позволяет избежать неблагоприятного воздействия на состояние и здоровье людей, работу вибросочувствительного оборудования, а в ряде случаев, разрушение конструкций.

Целесообразно производить периодический контроль за уровнем вибраций, который должен включать в себя, в частности:

- составление перечня подлежащих контролю объектов (машин, приборов, помещений и т.п.);
- визуальное обследование колебаний и их оценка, в частности, в соответствии с табл. 4.4.
- инструментальное обследование колебаний в зонах, где визуально отмечен повышенный уровень вибраций;
- периодические инструментальные обследования объектов, подлежащих контролю;

- разработка и осуществление, в случае необходимости, виброзащитных мероприятий; проверка их эффективности;
- документальное оформление результатов проведенных работ.

Повышение уровня колебаний в процессе эксплуатации зданий может быть связано с разбалансировкой машин, изменением жесткостных характеристик конструкций или основания, инерционных характеристик (массы), появлением дополнительных источников вибраций как внутри, так и вне зданий.

При реконструкции здания и (или) замене оборудования до начала реконструкции целесообразно выполнить такие работы:

- экспериментально определить динамические характеристики элементов конструкций, уровень и характер колебаний от оборудования;
- при реконструкции расчетом оценить динамические характеристики конструкций, также обращая внимание на возможность возникновения резонансных режимов;
- при замене оборудования без реконструкции здания, используя результаты экспериментального определения динамических характеристик, выполнить динамический расчет, уточнить схему расположения оборудования и, в случае необходимости, предусмотреть способы виброзащиты.

Во многих случаях повышенный уровень вибраций связан с достаточно очевидными ошибками при проектировании или реконструкции зданий и сооружений.

Одним из примеров неудачного выбора конструктивной схемы здания с виброактивным оборудованием – конструкции перекрытий над 1-ым этажом в основном здании ОАО «Рускарт». Несущие конструкции 2-х этажного здания – металлический каркас с сеткой колонн 10x10 м. главными балками в виде сварного двутавра. Установленными вдоль здания и вспомогательными балками с шагом 2, 5 м, приваренными в торцах к стенкам главных балок. Покрытие представляет собой железобетонную монолитную ребристую плиту. В качестве несъемной опалубки использовался профилированный металлический настил (см. рис. 7.1)

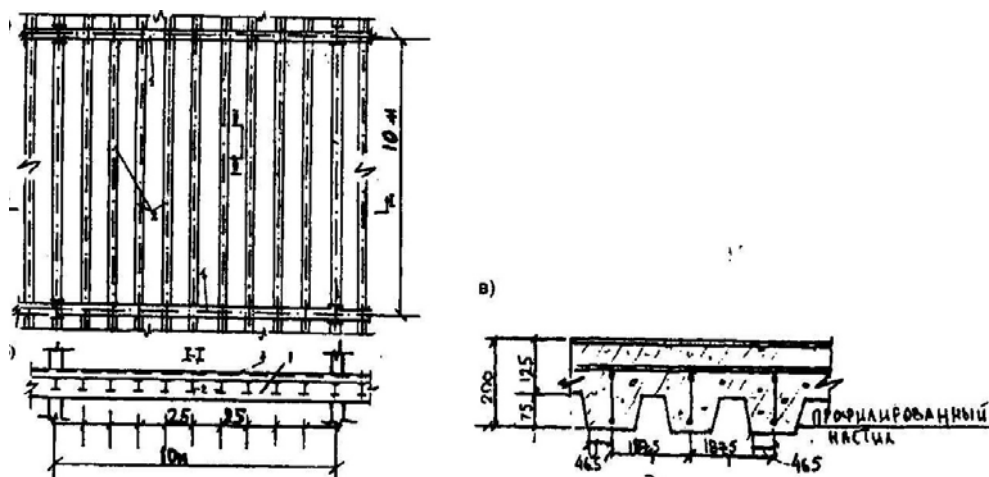


Рис. 7.1. а – фрагмент перекрытия здания ОАО «Рускарт», б – вид по 1-1, 1- главные балки – сварной двутавр 690х320, 2 – второстепенные балки – сварной двутавр 462х250, в – железобетонная плита перекрытия (по 2-2)

При инструментальном обследовании колебаний были зарегистрированы частоты собственных колебаний: 11 Гц и 8-8,5 Гц при возбуждении свободных колебаний соответственно главной и вспомогательной балок. Расчетные значения первых собственных частот, определенные по приближенным схемам их расчета балок, как однопролетных и жестко заземленным по концам, составили: 9,5 Гц – для главной балки и 9,2 Гц – для вспомогательных. На это перекрытие предполагалось установить линию для производства картофельных чипсов, в состав которой входит вибросито массой около 5,5 т. При работе сита возбуждается гармоническая нагрузка с частотой 7 Гц и амплитудой вертикальной составляющей силы 15 кН. Даже в том случае, если частоты собственных колебаний перекрытий совместно с оборудованием будут существенно (на 20% и более) отличаться от частот возмущения и не будут возбуждаться околорезонансные режимы амплитуды перемещений и скоростей ориентировочно будут составлять и в 5-6 раз превышать предельно допустимые значение для производственных предприятий на рабочих местах категории 3а и в 10-12 раз на рабочих местах категории 3б (см. табл. 7,8 СН2.2.4/2.1.8.566-96).

Из сказанного, в частности, следует:

- при установке на перекрытия виброактивного оборудования 3 и 4 категории динамичности во многих случаях определяющим при выборе конструктивной схемы могут являться результаты динамического расчета; пролеты перекрытий в этих случаях, по возможности, не должны превышать 6м;

- частоты собственных и амплитуды вынужденных колебаний перекрытий с подобными конструктивными схемами могут определяться по приближенным расчетным схемам. При этом вспомогательные и главные балки можно рассчитывать отдельно, учитывая в первом случае дополнительную массу плиты перекрытия и оборудования, а во втором – дополнительно массу вспомогательных балок.

На практике в большинстве случаев в зданиях и сооружениях, подвергающихся вибрационным воздействиям, повышенный уровень колебаний каркасов или элементов конструкций связан с возбуждением резонансных или околорезонансных колебаний. Источниками таких колебаний может быть оборудование, расположенное даже на значительном расстоянии. Колебания практически одинаково успешно могут распространяться как по конструкциям, так и через грунт.

Примеры того, что повышенный уровень вибраций может быть связан главным образом с возникновением околорезонансных колебаний, достаточно широко встречались при инструментальных обследованиях колебаний, проводимых, в том числе, при участии автора. Причем избежать

подобных ситуаций можно было исходя из достаточно простых соображений.

Несколько наиболее характерных случаев относятся к обоганительным фабрикам алмазодобывающей промышленности в Якутии. По технологической схеме грохоты на второй стадии обогащения кемберлитовой руды (до 30-40 штук) установлены на верхних отметках зданий на высоте 36-40 м. Грохоты массой 12-16 т, снабженные вибраторами направленного действия, установлены на стальные пружины. Частоты вертикальных грохотов составляют 2,5 – 2,7 Гц, вынужденных 12,25 Гц ($=77$ рад/с).

Нормируемым параметром при работе грохотов является амплитуда колебаний сита, которая должна составлять примерно 6 мм. Каркасы зданий фабрик металлические с сеткой колонн 6x6 м; 6x12 м. При расчете несущих конструкций (главных и вспомогательных балок) в пролетах, где установлены грохоты, определяющим был динамический расчет. Сечения балок подбирались из того условия, чтобы частоты собственных колебаний элементов перекрытий были не менее 20 Гц, что гарантировало квазистатический режим колебаний. Амплитуда колебаний балок под грохоты, вычисленные даже по приближенной (балочной) схеме близко совпали с реальными и составили 30-50 мкм.

Несущими конструкциями в соседних пролетах являются главные и вспомогательные балки, на которых уложен профилированный настил. Как следует из поверочных расчетов и опыта проектирования подобных конструкций низшие частоты собственных колебаний перекрытий в этих случаях составляют 10-16 Гц. При проектировании фабрик эти очевидные соображения не были учтены, поэтому режимы колебаний многих перекрытий, даже расположенных на нижних этажах (в зависимости от масс дополнительного оборудования), близки к резонансным с амплитудами перемещений до 30 мкм и скоростей до 2,4 мм/с. Такой уровень колебаний значительно превышает предельно допустимый по СН 2.2.4/2.18.566 – 96 (категория 3б).

Проблемы, связанные с колебаниями конструкций в пуско-остановочных режимах, также достаточно часто возникают при эксплуатации промышленных предприятий с виброактивным оборудованием.

Уровень колебаний виброизолированных установок при прохождении через резонанс в пускоостановочных режимах зависит как от диссипативных свойств упругих элементов (виброизоляторов), так и от скорости изменения числа оборотов машины 4,5.

На обоганительных фабриках алмазодобывающей промышленности в 90 гг. прошлого столетия были установлены грохоты ГИСТ-72, тогда еще советского производства, и фирмы Фурукава. Время остановки грохотов ГИСТ-72 составляло 40-45с. А японских (Фурукава) около 15 сек. Уровень колебаний грохотов ГИСТ -72 в резонансных режимах был выше примерно в 2,5-3 раза, что приводило к довольно быстрому разрушению, вследствие

малоцикловой усталости, стальных пружин. В качестве альтернативы под отечественные грохоты были установлены резиновые элементы, жесткость которых примерно в 4 раза выше пружинных. Частоты собственных колебаний установок составили 5-5,6 Гц. Поскольку определяющим параметром является амплитуда колебаний сита, которые в этом случае передавались на поддерживающие конструкции. Возросло примерно в 4 раза. Соответственно, примерно во столько же раз возрос уровень колебаний перекрытий.

Еще один пример связан также с эксплуатацией грохотов. Общая схема несущих конструкций перегрузочного узла на Верхнекамском фосфоритном руднике, на котором установлен грохот, показана на рис. 7.2.

Уровень колебаний опорных конструкций непосредственно под грохотом и в этом случае относительно невысок. Амплитуда колебаний на частоте 12,4 Гц не превышает 50 мкм. Колебания соседних пролетов, в которых могут находиться люди, близки к резонансным и их уровень существенно превышает допустимый (по СН 2.2.4/2.18.566-96). Достаточно высокий уровень колебаний конструкций («сильно ощутимые») наблюдался в режиме остановки грохота. Эти колебания возбуждались на частоте, близкой к частоте собственных колебаний грохота, которая практически совпадала также и с первой собственной частотой горизонтальных колебаний этажерки.

Возникновение резонансных колебаний оборудования или зданий очень связано с неправильным выбором параметров виброизоляции. Так, например, на Московском комбинате твердых сплавов шведские автоматы для штамповки алюминиевых деталей с частотой штамповки 2 удара в секунду были установлены на пружинные виброизоляторы. Частоты собственных колебаний установок равнялись 2,4-2,6 Гц, что естественно привело к значительному увеличению уровня колебаний как самих установок, так и перекрытий в залах.

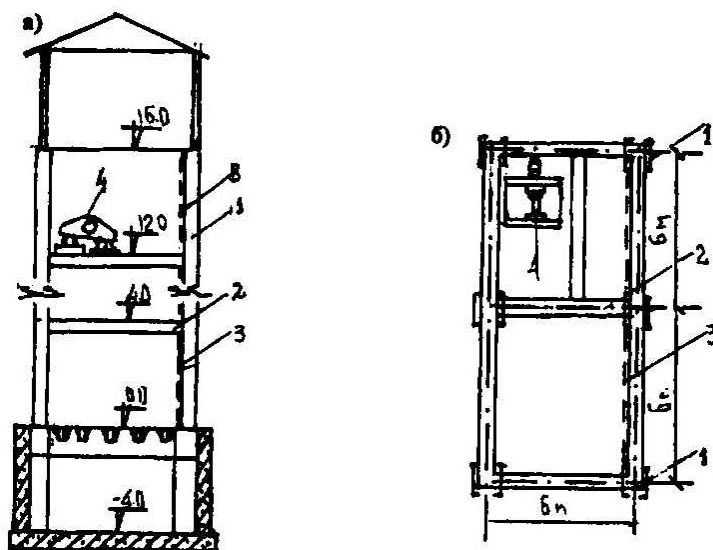


Рис. 7.2. а – схема этажерки под грохот ГИТ-51, б – план перекрытия стойки (IN55), 2- балки перекрытия, 3 -связи в вертикальной плоскости, 4 – грохот ГИТ-51

Достаточно сложная инженерная задача – виброизоляция ткацких станков, которые возбуждают колебания с широким спектром воздействий (от 2 до 15 Гц).

Сложность заключается в том, что виброизолируя станки и снижая усилия, передающиеся на перекрытия от гармоник с высокими частотами (свыше 5 Гц), можно спровоцировать резонансные колебания на низких гармониках.

Примерно такие же проблемы возникают и при виброизоляции зданий, расположенных вблизи железных дорог. При движении железнодорожных составов в зависимости от вида составов и скорости их движения частоты колебаний, передающихся через грунт, лежат в пределах 5-18 Гц. Частоты собственных колебаний зданий, установленных на резиновые виброизоляторы, не могут быть ниже 5-6 Гц. При применении виброизоляции во многих случаях могут быть снижены колебания перекрытий на высоких частотах (более 10 Гц). Однако для большинства ситуаций и, в частности, при прохождении товарных составов, существенно может возрастать уровень низкочастотных колебаний (до 7-8 Гц).

Подобная картина наблюдалась, например. При инструментальном обследовании колебаний 2-х этажного виброизолированного административного здания с металлическим каркасом, расположенного вдоль Октябрьской железной дороги вблизи станции Петровско-Разумовская.

Очевидно, что проблема виброизоляции зданий вблизи железных дорог, как и вблизи магистралей с интенсивным автомобильным движением, требует дополнительного изучения и тщательного анализа результатов обследований уже виброизолированных зданий.

И в заключении отметим, что в практике обследования колебаний зданий и сооружений, проведенных, в частности, в отделе динамики ЦНИИСК им.Кучеренко, достаточно часто встречались ситуации, когда высокий уровень вибраций, близких к резонансным, возбуждался машинами или оборудованием, расположенными на значительном расстоянии от объектов – от лесопильной рамы на расстоянии нескольких километров, компрессоров и даже работающих движков речного буксира на расстоянии нескольких сот метров (до километра).

1. Баркан Д.Д. Динамика оснований и фундаментов. – М.: Стройвоенмориздат, 1948.
2. Вейнер Д., Цейтман А.И. Вибрационные повреждения в промышленном строительстве. Москва-Стокгольм, Шведский Совет по исследованиям в строительстве, Научно-технический центр «Защита сооружений» Инженерной Академии России, 1994.
3. Дашевский М.А., Миронов Е.М. Защита окружающей среды от динамических воздействий поездов метрополитена// Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. -2000. - №4. – с.36-39.

4. Динамический расчет зданий и сооружений: Справочник проектировщика/ под ред. Б.Г. Коренева, И.М. Рабиновича. 2-ое изд. – М.: Стройиздат, 1984.
5. Инструкция по расчету несущих конструкций промышленных зданий и сооружений на динамические нагрузки. М.: Стройиздат, 1970.
6. Пятецкий В.М., Александров Б.К., Савинов О.А. Современные фундаменты машин и их автоматизированное проектирование. – М.: Стройиздат, 1993.
7. Руководство по проектированию фундаментов машин с динамическими нагрузками. – М.: Стройиздат, 1982.
8. Савинов О.А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет. – 2-е изд. – Л.:Стройиздат, 1979.
9. Чернов Ю.Т. Вибрации строительных конструкций. – М.: Издательство АСВ, 2006.

Нормативные документы.

- 1*. ГОСТ 24346-80. Вибрация. Термины и определения.
- 2*. ГОСТ 25980-83. Вибрация. Средства защиты. Номенклатура параметров.
- 3*. ГОСТ 26043-83. Вибрация. Динамические характеристики стационарных машин.
- 4*. ГОСТ 12.1.034-81. Вибрация. Общие требования к проведению измерений.
- 5*. ГОСТ 26568-85. Вибрация. Методы и средства защиты. Классификация.
- 6*. ГОСТ 28362-89 (ИСО 2017-82). Вибрация и удар. Виброизолирующие устройства.
- 7*. Гост 12.1.012-90. Вибрационная безопасность. Общие требования.
- 8*. СН.2.24/2.1.8.566-96. Санитарные нормы. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. М., 1997.
- 9*. СНиП 2.02.05-87. Фундаменты машин с динамическими нагрузками. М., 1989.

Автоматические системы контроля технического состояния высотных и большепролетных зданий и сооружений.

На сегодняшний день основной перспективой развития систем мониторинга ответственных сооружений является создание профессионально разработанных постоянно действующих автоматических систем контроля технического состояния объекта. Такие системы, наряду с другим системами контроля – тепло и водоснабжения, пожарной безопасности, климатических условий и т.п. функционирует в автоматическом режиме с выводом информации на централизованные диспетчерские пункты в соответствие с концепцией так называемого «умного дома». Исходная информация о состоянии объекта при помощи преобразователей различного типа – линейных и угловых перемещений, усилий и напряжений и т.д. собирается на компьютеризованных измерительных приборах в пределах локальных зон, обеспечивающих стабильность измерений. Далее, по локальным компьютерным сетям информация поступает и обрабатывается в централизованном диспетчерском пункте, своевременно выдавая предупреждение возможности о возникновении аварийной ситуации.

Современный подход к вопросам безопасности высотных и большепролетных объектов требует разработки систем автоматического контроля еще на стадии проектирования с учетом основных конструктивных и функциональных особенностей сооружений, с последующей их реализацией при строительстве и эксплуатации. При этом для более эффективного предупреждения развития аварийных ситуаций такие системы должны дополняться процедурами периодического контроля физических и геометрических параметров технического состояния конструкций.

Геодезический мониторинг пространственно-координатного положения высотных и большепролетных зданий и сооружений.

Сложные инженерно-геологические условия возведения сооружений в мегаполисах, воздействие различных природных и техногенных нагрузок, в

первую очередь ветровые нагрузки и осадки основания - все эти факторы являются причинами развития различного рода деформаций строительных сооружений. По этой причине мониторинг деформационных процессов являются важнейшей составляющей любой системы контроля технической безопасности ответственных объектов.

Методика геодезического мониторинга для ответственных сооружений должна быть разработана с учётом возможных геологических, технологических и технических причин возникновения деформаций (изучение инженерно-геологических особенностей территории застройки, расчетных величин нагрузок и деформаций), а также требований к необходимой точности измерений.

Деформации рассматриваемых объектов могут иметь сложный пространственный характер, который зачастую невозможно выявить в полном объеме в ходе традиционной вертикальной геодезической съемки. На сегодняшний день пространственные геометрические характеристики деформационных процессов могут быть определены с применением целого ряда разнообразных геодезических методов и современных приборов.

GPS-измерения.

Перспективными геодезическими средствами, используемыми для решения задачи пространственно-координатного мониторинга, являются приборы GPS-позиционирования, которые на современном этапе позволяют определять пространственные координаты точек с точностью до 1 см, что для высотных сооружений с возможными горизонтальными перемещениями порядка нескольких десятков сантиметров представляет довольно высокую точность.

Исключение ошибок при измерениях производится при дифференциальном способе наблюдений - DGPS (Differential GPS). Измерения выполняются двумя приемниками: один устанавливается в определяемой точке - роверная станция, а другой располагается в точке с

известными координатами - базовая (контрольная) станция. В режиме DGPS измеряют не абсолютные координаты первого приемника, а его положение относительно базового (вектор базы). При дифференциальном режиме съемки точность фазовых измерений достигает миллиметровой точности. Наилучшие показатели имеют фазовые двухчастотные приемники (рис 1). Они отличаются от фазовых одночастотных более высокой точностью, более широким диапазоном измеряемых векторов баз и большей скоростью и устойчивостью измерений.



Рис. 1. Фазовый 2-х частотный GPS-приемник Trimble 5700.

Точность при статической съемке:

СКО в плане 5 мм + 0,5 мм/км

СКО по высоте 5 мм + 1 мм/км

Точность при кинематической съемке:

СКО в плане 10 мм + 1 мм/км

СКО по высоте 20 мм + 1 мм/км

С помощью GPS-систем могут быть эффективно определены динамические показатели колебаний высотных зданий от ветровых воздействий. С помощью постобработки информации определяются фоновые и резонансные компоненты смещения в направлениях по ветру и перпендикулярно ему, что дает представление о фоновом компоненте структурной реакции высотного здания для сравнения с его расчетами в аэродинамической трубе.

Тахеометрическая съемка.

Для периодического контроля пространственного положения объектов могут быть использованы современные электронные тахеометры, отвечающие заданным требованиям к точности измерения деформаций сооружений.

В качестве автоматизированных систем непрерывного контроля перемещений сооружений наиболее распространены на сегодня решения, представленные такими производителями как Trimble Navigation и Leica Geosystem.

Безотражательные тахеометры позволяют производить с высокой точностью съемку недоступных для установки отражательных призм точек на фасадах зданий. Возможность автоматизированных измерений обеспечивает система самонаведения приборов на специальные активные отражатели (технология Autolock). Роботизированные измерения осуществляются с помощью технологии Robotic, при этом управление прибором и сбор данных измерений осуществляется дистанционно по радиомодему.

Роботизированные системы эффективно используются для слежения за деформациями объектов, съемки движущихся объектов и т.д. В электронном тахеометре Trimble S8 (точность измерения углов 1" и расстояний 1мм+1мм/км), специально разработанном для мониторинга и используемом совместно с программным обеспечением для постобработки измерений Trimble 4D Control, используется технология MultiTrack™, которая предоставляет возможность слежения как за пассивными отражателями, так и за активными отражателями. Электронный тахеометр обнаруживает и отслеживает разнообразные цели и обычные отражатели на очень больших расстояниях. Программное обеспечение Trimble 4D Control считывает данные приемов из Trimble S8 в виде отдельных сеансов и указывает любое перемещение целей с течением времени. Результаты в наглядном графическом интерфейсе легко анализировать, а программа настраивается для предоставления таких функций, как предупреждения о перемещении цели и оповещения.



Рис. 2. Станции автоматического мониторинга

a) Trimble S8 b) Leica TCRP1201 R300

Leica GeoMoS (Geodetic Monitoring System) - это программное обеспечение для мониторинга и анализа текущего состояния наблюдаемого объекта, которое позволяет комбинировать данные, получаемые электронными тахеометрами фирмы Leica.

Leica GeoMoS состоит из трех основных приложений:

- Монитор (Monitor) - приложение, работающее в режиме реального времени, ответственное за получение информации с датчиков, осуществляет сбор и обработку данных, управляет возникающими событиями.
- Анализатор (Analyzer) - приложение, работающее в автономном режиме, предназначено для анализа, визуализации и постобработки данных.
- Уравнивание (Adjustment) - программное расширение, которое позволяет пользователю принимать решения, основанные на статистически оптимизированных и выверенных данных.

Лазерное сканирование.

Лазерное сканирование на сегодняшний день зарекомендовало себя как высокопроизводительная технология, которая может эффективно применяться для решения проблемы пространственно-координатного мониторинга объектов большой сложности и насыщенности. Точность

измерений лазерных сканеров лежит в диапазоне от 1мм до 10мм на расстояниях до 1000м, при этом количество измерений в секунду может составлять до 100 000 точек.

Первичным результатом получаемых данных является трехмерное облако точек, преобразуемое впоследствии с помощью специального программного обеспечения в электронную пространственную модель объекта, на основании которой определяются перемещения, и оценивается состояние сооружения по сравнению с предыдущим этапом измерений.

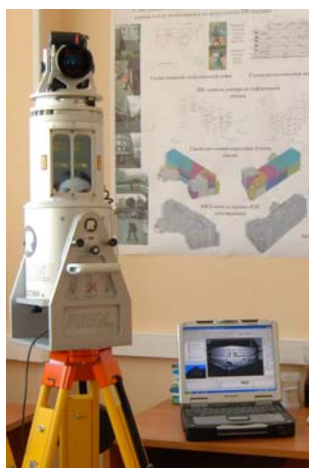


Рис. 3. Наземный лазерный сканер Riegl-Z390i:

- диапазон измерения до 400 м
- скорость измерений до 11 000 точек/сек
- точность измерения дальности
4 мм (одиночный импульс)
2 мм (осредненная величина)
- разрешение измерения по дальности 6мм

Лекция 11

Направления и перспективы научных исследований в области обеспечения безопасности и мониторинга большепролетных и высотных сооружений.

Инженерные изыскания

1. Усовершенствование методов геодезических измерений на стадии инженерных изыскания под новое строительство в условиях стесненного доступа и плотной городской застройки.
2. Проведение геодезических измерений в ходе мониторинга ответственных объектов в автоматическом режиме.
3. Сопоставительный анализ достоверности инженерно-геодезических методов прогнозирования изменения несущей способности конструкций.

Проектирование

1. Разработка автоматизированных систем мониторинга строительных сооружений на базе современных методов неразрушающего контроля технического состояния несущих конструкций и интегрированного программного обеспечения, обеспечивающего оперативный анализ и предупреждений аварийных ситуаций
2. Предварительное моделирование осадочных процессов с учетом геологической структуры и совместной работы системы «основание-сооружение» для объективного прогнозирования величин предельно допустимых значений деформаций, при которых обеспечиваются нормативные значения НДС несущих конструкций эксплуатируемых сооружений.
3. Разработка методик актуализации МКЭ-моделей сооружений, подвергаемых мониторингу в ходе эксплуатации с учетом изменения технического состояния несущих конструкций

Строительство

1. Разработка технологий монтажа и установки автоматических систем мониторинга технического состояния ответственных сооружений в ходе строительства.
2. Разработка геодезического обеспечения измерения проектной геометрии верхних этажей возводимых высотных зданий с учетом динамики их перемещений.

Мониторинг в ходе эксплуатации

1. Разработка технологий и регламентов автоматического мониторинга технического состояния в процессе эксплуатации ответственных сооружений на базе интегрированных программно-аппаратных комплексов.
2. Автоматизация регистрации и обработки результатов мониторинга пространственного положения и деформаций строительных объектов за счет использования лазерных сканеров, GPS-приборов точного позиционирования и специализированных преобразователей других типов.
3. Учет дефектов и повреждений конструкций эксплуатируемых ответственных зданий и сооружений при оценке их технического состояния с помощью МКЭ-моделирования.
4. Разработка специализированного программного обеспечения, позволяющего совместить процедуры формирования пространственно-координатной модели и автоматизированной интерполяции ее перемещений в МКЭ-модель.