

Канчели Н.В., Батов П.А., Дробот Д.Ю.

РЕАЛИЗОВАННЫЕ МЕМБРАННЫЕ ОБОЛОЧКИ. РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ВОЗВЕДЕНИЕ

С 2000-2008 г специалистами ЗАО «Курортпроект» были запроектированы две мембранные оболочки в г. Коломна, и в г. Ангарск. Сооружения, несмотря на различные размеры, весьма схожи по конструктивной основе, что показывает широкие возможности формообразования мембранных оболочек.

ПЕРЕКРЫТИЕ ГЛАВНОГО ЗАЛА КОНЬКОБЕЖНОГО СТАДИОНА В Г. КОЛОМНЕ

(конструкторский коллектив: Канчели Н.В., Митюков М.М., Тимофеевич А.В.,
Владимиров Е.Н.).

Выбор оптимального покрытия и его приближённый расчёт.

Спортивный комплекс, предназначенный для проведения соревнований международного уровня, предполагалось возвести на месте старого спортивного центра буквально в нескольких сотнях метров от стен и башен Коломенского кремля, в границах охранной зоны. Агрессивное по архитектуре современное здание было бы неуместно в данном контексте, единственным приемлемым вариантом стало строительство здания-«невидимки». Требовалось «обернуть» в несущие и ограждающие конструкции главный зал с конькобежной дорожкой и трибунами, и при этом добиться красивой, выразительной формы.



Рис. 1. а) Подача рулонированных полотнищ мембраны, их раскатка по временным элементам постели.
б) Законченное мембранное покрытие, вид с противоположного берега реки Коломенка

Формулирование концепции сооружения и решение контекстуальных задач не были приоритетными на первом этапе работы над проектом. Правительство Московской области объявило тендер на проект будущего центра, пригласив к участию в нем конструкторов. Такой подход не случаен: без решения проблемы перекрытия огромного зала было бессмысленно обсуждать этот проект. Конкурсные предложения принимались скорее по экономическим, чем по эстетическим критериям. Прекрасно понимая важность этого аспекта, команда проектировщиков под руководством Канчели Н.В. представила на рассмотрение жюри не один, а пять вариантов различных конструктивных систем, сравнив их по основным технико-экономическим показателям. По всем пунктам лидировала

мембранная оболочка — эlegantное седлообразное покрытие, словно обволакивающее пространство над катком.

Эллипсовидная форма главного объема и пластичное покрытие оказывались наиболее экономичным вариантом по расходу стали и по сокращению отапливаемого объема здания, что напрямую связано с сокращением эксплуатационных затрат. Конечно, аналогичные конструкции последний раз строились в России десятки лет назад, но очевидные преимущества мембранного покрытия склонили чашу весов в пользу этого варианта.

Можно сказать, что в поисках функциональной целесообразности в нем было определено единственно верное решение, отвечающее одновременно как конструктивным требованиям к будущему зданию и экономическим расчетам, так и эстетическим задачам, которые в дальнейшем были развиты командой архитекторов, присоединившихся к работе над проектом.

Заказчиком проекта выступила организация ГУП ПИ «Мособлстройпроект». Генеральным проектировщиком комплекса был выбран проектный институт ЗАО «Курортпроект». Научное сопровождение осуществляли специалисты ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Генеральным подрядчиком объекта стала корпорация «Трансстрой», производителем монтажных работ и разработчиком ППР – 1 МСМУ АО «Стальмонтаж». Спортивный комплекс разместился на прибрежной террасе у впадения реки Коломенки в реку Москву в непосредственной близости от коломенского Кремля. Все помещения здания, кроме центрального зала, расположены в стилобатной части, образующей искусственную береговую террасу реки Коломенки. Объем центрального зала врезан на 6 м в эту террасу и представляет собой эллипс. Зал перекрыт стальной мембраной. Применение висячего покрытия на овальном плане позволило создать сооружение минимального объема при обеспечении соответствующих требований внутренней планировки, спортивной технологии, размещения трибун и зон видимости.

При разработке проекта авторы взяли за основу следующий тезис: «форма большепролётного покрытия должна наиболее полно отвечать функции сооружения, которое оно перекрывает». Также форма покрытия спортивного сооружения определяется 4-мя главными параметрами: вместимостью трибун, требуемой высотой помещения в зоне водостоков, в зоне центра сооружения и высотой в середине длинной стороны.

В соответствии с архитектурным заданием конькобежный стадион должен иметь вытянутую беговую дорожку с размерами 178 x 68 м и трибуны, расположенные вдоль длинных сторон. В таком случае требуется покрытие овальной формы, имеющее наиболее высокие точки по серединам длинных сторон. Если плавно очертить требуемые высоты вдоль контура сооружения, то получится пространственная кривая на овальном плане с низшими точками по серединам коротких сторон и высокими по центрам длинных. Такая форма обеспечивает расположение зрительских трибун, комментаторских и судейских кабин вдоль длинных сторон объекта. С учетом необходимости стока воды с покрытия его оптимальной формой является седлообразная поверхность на эллиптическом плане.

При проектировании оболочечных систем очень важно минимизировать изгибающие моменты в разных элементах покрытия (поле оболочки, опорный контур, колонны и фундаменты). Поскольку поле мембраны не может быть моментным кроме малых краевых эффектов, колонны и фундаменты при шарнирных узлах по верху и низу при наличии связей в плоскостях наружных стен также не могут воспринимать моментные усилия. Тогда опорный контур в основном будет работать на сжатие, при этом испытывая незначительные

изгибающие моменты лишь в вертикальной плоскости. Таким образом, основная задача заключается в обеспечении безмоментности опорного контура. Последнее условие реализуется при следующем соотношении размеров сторон в плане:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{l_1^2}{l_2^2}.$$

Вывод функциональных зависимостей подробно освещен в работе [1] (§2, глава 1). По следующим формулам были выполнены приближённые ручные расчёты мембранной оболочки на равномерную симметричную нагрузку:

$$T_1 = q \cdot \frac{l_1^2}{2(f_1 + f_2)} = 0.3 \cdot \frac{100^2}{2 \cdot (9.5 + 3.5)} = 115 \frac{m}{m},$$

$$T_2 = q \cdot \frac{l_2^2}{2(f_1 + f_2)} = 0.3 \cdot \frac{100^2}{2 \cdot (9.5 - 3.5)} = 35 \frac{m}{m},$$

$$N_{\max} = T_2 l_1 = 35 \cdot 100 = 3500m,$$

$$N_{\min} = T_1 l_2 = 115 \cdot 55 = 6325m,$$

где: T_1 – усилие в мембране вдоль длинной оси,
 T_2 – усилие в мембране вдоль короткой оси,
 $l_1 = 100$ м – большая полуось эллипса,
 $l_2 = 55$ м – меньшая полуось эллипса,
 $f_1 = 9.5$ м – стрела провиса мембраны по малой оси,
 $f_2 = 3.5$ м – стрела подъёма мембраны по большой оси,
 q – полная расчётная нагрузка,
 N_{\max}, N_{\min} – максимальное и минимальное усилие в опорном контуре.

Результаты приближенных расчетов достаточно близко совпали с компьютерными, что подтверждает применимость на практике вышеуказанных формул.

Конструктивное решение. Порядок монтажа. История возведения. Мембрана была образована раскаткой рулонов покрытия из стали толщиной 4 мм по смонтированным элементам «постели», которые крепятся к металлоконструкциям опорного контура. Конструктивно «постель» решена в виде системы параллельных элементов из листовой стали 150 х 4 мм, идущих с шагом 4 м. Узел примыкания постели к фартуку имеет регулировочное устройство, позволяющее осуществлять подтяжку постели. Во время монтажа для уменьшения деформаций из плоскости от действия ветровых нагрузок, постель раскрепляется системой временных распорок. Сварка полотнищ мембраны производится после укладки всех элементов мембраны в проектное положение. Провис мембраны в поперечном направлении в период монтажа составляет 9.5 м, а вспарушенность в продольном направлении для обеспечения водоотвода – 3.5 м.

Бортовой элемент опирается по периметру с шагом около 12 м на шарнирные стойки трубчатого сечения высотой от 7 до 20 м, диаметром 430 мм. Заполнение изнутри стоек пескобетоном класса В25 существенно повышает их стойкость к аварийным (взрывным) нагрузкам. Опорный контур здания вдоль продольных сторон дополнительно опирается на две арки пролетом около 70 м, необходимые для перешагивания через существующий дворец спорта. Арки обеспечивают устойчивость сооружения и восприятие ветровых

нагрузок в направлении продольной оси. Арочные фермы запроектированы из сварных двутавров Н-образного сечения. В поперечном направлении устойчивость сооружения на стадии строительства обеспечивается малыми арками, а на стадии эксплуатации – ж.б. стенами, расположенными по торцам сооружения. Опорный бортовой элемент оболочки имеет прямоугольное сечение размерами 1.2 x 1.5 м, выполнен в виде заполненного бетоном стального короба, с уложенной внутри арматурой.



Рис. 2. а) Заваренное мембранное покрытие зимой 2004-2005 годов.

б) Сдача объекта в эксплуатацию летом 2006 года.

При строительстве была использована наиболее рациональная схема монтажа мембранных оболочек - раскатка рулонов мембраны по заранее смонтированной висячей «постели». Во время монтажа оболочка представляет собой дискретную систему с вантами, расположенными в параллельных плоскостях. Контур такой системы для возможности сохранения ее формы при монтаже мембранных листов должен быть раскреплен временными связями: подкосами или затяжками. В данном случае бортовой элемент подпирается наклонными стойками с песочными домкратами у нижней опоры. Песочный домкрат представляет собой стальной цилиндр с поршнем. Пространство между цилиндром и поршнем засыпано мелким сухим песком. Для снятия усилия с домкрата в цилиндре выполнено отверстие с винтовой заглушкой. Снятие усилий с домкратов производится одновременно этапами по 3-5 мм. В начальный момент монтажа мембранных листов усилия в подкосах или затяжках нулевые, после окончания монтажа усилия в них достигают максимального значения. После заварки листов мембраны между собой и контуром система превращается в континуальную систему, способную работать в двухосном напряженном состоянии. Повисшая на опорном контуре мембрана обеспечивает его устойчивость и малую деформативность. При снятии усилий с временных подкосов, в провисающем направлении мембраны контур перемещается к оси оболочки, а во вспарушенном направлении контур перемещается в сторону от оси оболочки. При этом происходит преднапряжение мембраны в обоих направлениях.

Монтаж подобного сооружения достаточно сложен и предусматривает ряд этапов:

1. Возводится статически определяемая опорная система, состоящая из фундаментов, шарнирных стоек и системы связей по осям оболочки.
2. Устанавливаются временные связи, в данном случае в качестве которых выступают подкосы по длинной стороне оболочки. Подкосы обеспечивают

- близость опорного контура к безмоментности в плане до заварки мембранных листов между собой и контуром.
3. Монтируются элементы постели, которые развязываются системой распорок. Выверка элементов постели производится по нижним отметкам их провиса.
 4. По постели растаскиваются лебедками рулонированные листы мембраны, затем производится заварка листов между собой и с контуром.
 5. По специальной программе производится демонтаж временных связей и элементов постели.

О компьютерных расчётах конструкции.

Расчет сооружения на все предусмотренные нормами нагрузки и воздействия на всех этапах монтажа и в стадии эксплуатации производился в геометрически нелинейной постановке на двух программах разных разработчиков. Дополнительно поверочный расчет был выполнен специалистами Киевского НИИАСС. Результаты расчета по всем вариантам для контроля сравнивались между собой. Кроме того, учитывая сложность и уникальность сооружения, была проведена испытания на модели масштаба 1:50 в лаборатории НИИ транспортного строительства (ЦНИИС).

При порядке монтажа, реализованном в натуре, оболочка до заварки листов мембраны между собой и к опорному контуру представляет собой дискретную систему из параллельно расположенных висячих стальных полос. После заварки мембраны она вместе с опорным контуром преобразуется в континуальную оболочку. Как следствие расчёт этих двух состояний различен:

- на первом этапе рассчитываются отдельные висячие нити на вес мембраны, а опорный контур на систему параллельных сил от распора висящей «постели» и на восприятие нагрузок от веса «мокрого» бетона при его бетонировании,
- на втором этапе континуальная мембрана с опорным контуром рассчитывается на все постоянные и временные нагрузки.

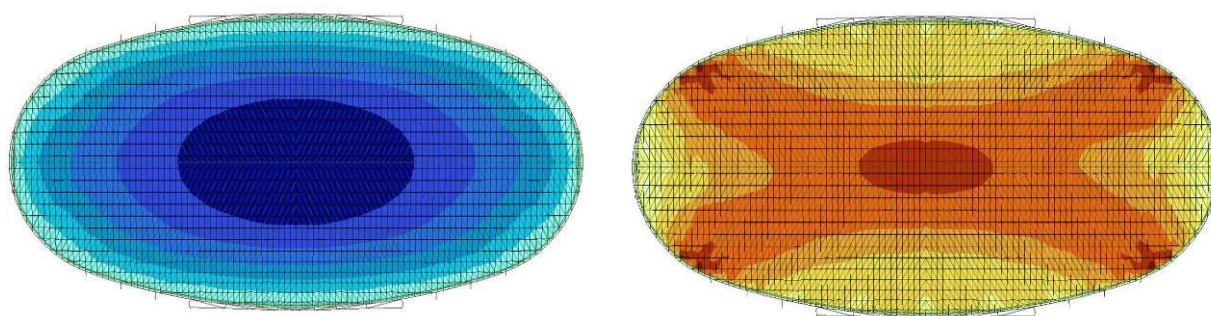


Рис. 3. а) Схема деформаций по вертикали мембранного полотна,
б) схема распределения действующих в полотне мембраны главных напряжений

Для учёта изменения расчетной схемы в процессе возведения и геометрической нелинейности системы, специалистами ЗАО «Курортпроект» был применен программный комплекс «ЛИРА 9.2» (модуль «Монтаж+»). Для выявления резервов несущей способности мембранного покрытия фирмой «HEXA» (<http://www.hexa.ru>) был выполнен компьютерный расчёт с увеличенной снеговой нагрузкой. Расчёт проводился в программном комплексе «ABAQUS». При расчёте были приняты следующие коэффициенты перегрузки $k_1 = 1.37$, k_2

= 1.94, $k_3 = 2.93$. В результате расчётов установлено, что при коэффициенте перегрузки $k \sim 2.7$, соответствующему снеговой нагрузке интенсивностью 486 кг/м^2 , происходит выпрямление впадины оболочки в продольном направлении.

Торжественный пуск в эксплуатацию конькобежного стадиона состоялся летом 2006 года. Данный проект был удостоен бронзового диплома на международном фестивале "Зодчество 2004", является лауреатом в номинации "Конструктивная деталь/узел (реализация)" и номинантом в номинации "Конструктивная схема здания" независимой премии в области российской архитектуры ARX AWARDS 2006.

ПЕРЕКРЫТИЕ ГЛАВНОГО ЗАЛА ХОККЕЙНОГО СТАДИОНА В Г. АНГАРСК

(конструкторский коллектив: Канчели Н.В., Владимиров Е.Н., Батов П.А., Дробот Д.Ю).

Выбор оптимального покрытия и его приближённый расчёт.

Покрытие хоккейного стадиона возводится над существующей ареной с трибунами по двум противоположным сторонам. Такое условие предопределило устройство более высокой части покрытия по двум сторонам, где расположены трибуны, и опускающейся части по двум другим. Было принято решение применить новый тип мембранной оболочки на прямоугольном плане с временными затяжками по авторскому свидетельству разработчиков проекта.

Покрытие прямоугольное в плане $90 \times 87 \text{ м}$ представляет собой оболочку переноса, образованную движением провисающей параболы пролетом 90 м со стрелкой 10 м по впадине параболы пролётом со стрелкой 2.5 м .

Поскольку для монтажа мембраны применена система раскатки стальных рулонированных листов по заранее смонтированной «постели», а заварка листов между собой и к опорному контуру производится после раскладки всей мембраны, то система принципиально меняет в процессе монтажа свою расчетную схему.

Для уменьшения деформативности и величины изгибающих моментов в оболочку введены два конструктивных элемента: системы распорок по углам опорного контура и временные затяжки, соединяющие между собой крайние точки угловых усилений в направлении, перпендикулярном элементам постели (авторские свидетельства №102806, №1096352).



Рис. 4. а) Смонтированный опорный контур на временных опорах
б) Начало навески нитей «постели».

Уравнение поверхности оболочки имеет вид:

$$z = \frac{f_2}{l_2^2} y^2 - \frac{f_1}{l_1^2} x^2.$$

Аналитический расчет такой оболочки весьма сложен. Задание начальных параметров системы для компьютерных расчетов можно выполнить по табл. 3. При дальнейших расчетах параметры должны уточняться.

Следует отметить, что первый вариант покрытия был разработан еще в институте «Союзкурортпроект». Тогда покрытие представляло собой цилиндрическую оболочку с размерами в плане 90 x 87 м и стрелой провиса 9.5 м, и выполнялось из стального листа толщиной 3 мм. Замкнутый опорный контур из сборно-монолитного железобетона имеет сечение 1 x 1.5 м с утолщением по углам по 1 x 3.8 м. В рамках диссертационной работы Филлипова М.Д. были выполнены необходимые численные исследования для выбора оптимальной формы покрытия. В процессе исследования варьировались: отношение сторон плана, жесткостные характеристики опорного контура и стрелы провисания мембраны. По результатам комплекса исследований были сделаны следующие выводы о напряженно-деформированном состоянии квазицилиндрических мембран на прямоугольных планах с монтажными регулирующими затяжками:

В результате исследования на основе трех параметров были получены формулы для предварительного подбора параметров мембранной оболочки предложенной конструкции.

Таблица 1.

f	h	δ_m	L	ab	$a_{\text{угл}}$	$b_{\text{угл}}$	$N_{\text{п}}$
0.1A	1.2f	$0.65 \frac{qA^2}{fR_y}$	0.4 B	$\frac{qA^2 B}{2fR_b}$	a	3b	$\frac{d\gamma_m \delta_m A^2}{2f}$

Исходные и определяемые параметры:

- 2A – размер оболочки в направлении криволинейного борта,
- 2B – размер оболочки в направлении прямолинейного борта,
- q – нагрузка на 1 м² площади покрытия,
- R_y – расчетное сопротивление стали,
- R_b – расчетное сопротивление бетона на сжатие,
- N_п – усилие в элементах постели,
- d – шаг элементов постели,
- δ_m – толщина мембраны,
- ab – площадь поперечного сечения опорного контура.

Конструктивное решение. Порядок монтажа. Мембрана, выполненная из стального листа толщиной 4мм, возводится раскаткой рулонированных стальных листов по висячей «постели». Висячая «постель» представляет собой систему дискретных висячих элементов, расположенных вдоль одной из осей сооружения, где поверхность прогнута вниз. «Постель» выполнена из стальных полос 150 x 6 мм, идущих с шагом 2,0 м.

Опорный контур оболочки имеет прямоугольное сечение размерами 1.2 x 1.5(h) м, выполнен в виде заполненного бетоном стального короба с уложенной внутри арматурой.

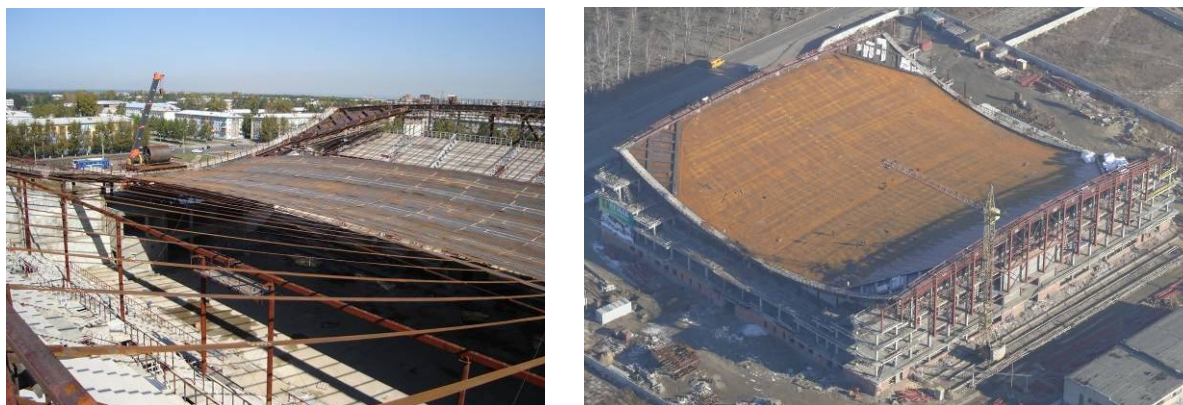


Рис. 5. а) Раскладка полотнищ мембраны по временным элементам «постели».
б) Законченное мембранное покрытие. Осень 2007г.

Если на стадии до заварки мембраны не принять некоторые временные конструктивные меры, то изгибающие моменты и перемещения в горизонтальной плоскости контура будут в несколько раз больше, чем перемещения и моменты в эксплуатационной стадии. С целью увеличения жесткости опорного контура и уменьшения моментов в нем в углах оболочки с помощью ортогональной балочной клетки выполнены четыре жестких в плоскости поверхности угловых участка. Эти участки попарно соединены временными стальными затяжками, демонтируемыми после заварки мембраны. Регулируемые затяжки позволили сократить деформации контура и уменьшить изгибающие моменты в несколько раз. Сечение затяжек было подобрано из следующего условия: перемещения центральных точек опорного контура при максимальном нагружении оболочки (зимний период) не должны превысить величин его предварительно выгиба.

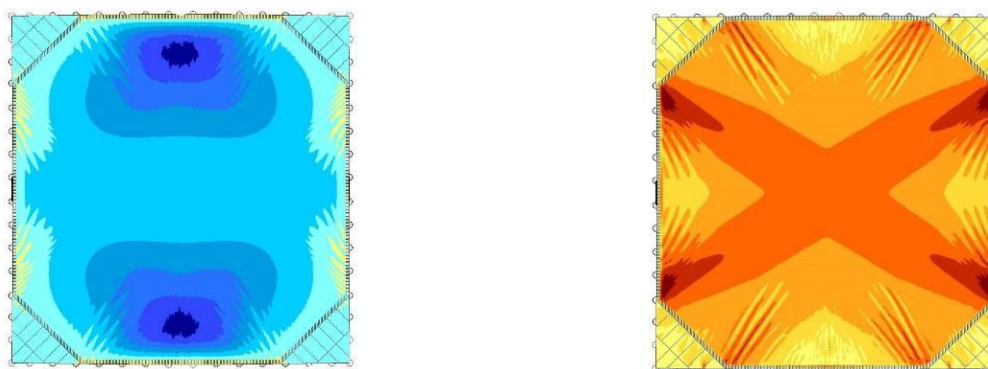


Рис. 6. а) Схема деформаций по вертикали мембранного полотна, схема распределения
б) действующих в полотне мембраны главных напряжений

Опорная система оболочки воспринимает вертикальные и горизонтальные воздействия и обеспечивает общую устойчивость сооружения при сохранении возможности свободного перемещения опорного контура в направлении ортогональном плоскости наружных стен. Это достигается устройством колонн с полными шарнирами с обоих концов, что позволяет не передавать изгибающие моменты на колонны и нижележащие конструкции при изменении вертикальных нагрузок на покрытие. Все горизонтальные воздействия (ветер, сеймика и т.д.) воспринимаются плоскими рамами с цилиндрическими шарнирами в их плоскости по осям наружных стен. Сама же мембранная оболочка активно работает в диагональном направлении. Такое направление является наиболее растянутым, а

перпендикулярно ему в приопорной зоне возле контура от сжимающих напряжений малой интенсивности образуются складки (волны). Максимальные прогибы покрытия получаются в зоне с наименьшей жесткостью – зоне, повисшей на диагональном кресте (см. рис. 6).

Основные этапы порядка монтажа оболочки совпадают с этапами монтажа при строительстве оболочки в г. Коломна.

Проектная группа авторов вышеприведенных материалов на договорной основе осуществляет следующие виды работ:

1. Проектирование:

- жилых зданий;
- офисных и административных зданий;
- многофункциональных комплексов, в т.ч. высотных;
- торговых и складских центров;
- спортивных сооружений;
- инженерных сооружений;
- промышленных зданий и сооружений;
- объектов реконструкции и реставрации.

2. Консультирование и сопровождение:

- разработчиков архитектурных решений и концепций;
- разработчиков технических решений по разделу "Конструктивные и объемно-планировочные решения";
- в области компьютерных расчетов несущих конструкций.
-

3. Поверочные расчеты зданий и сооружений в программных комплексах ("Лира", "Скад", "Ing +" и пр.), в том числе специфические расчеты:

- расчеты на прогрессирующее (лавинообразное) разрушение;
- расчеты объектов в сейсмической зоне, расчеты сооружений с учетом физической и геометрической нелинейностей;
- расчеты систем основание - фундамент - сооружение.

4. Авторский надзор за строительством.

5. Инженерное обследование зданий и сооружений:

- визуальное обследование и обмерочные работы;
- выявление повреждений и деформаций, вскрытия при необходимости;
- лабораторный анализ с определением прочностных характеристик материалов конструкций и грунтов основания;
- перспективная оценка состояния и эксплуатационных качеств здания;
- выдача заключения и при необходимости рекомендаций для работ по восстановлению и усилению конструкций.

6. Негосударственная экспертиза проектной документации.

Дополнительную информацию, а также координаты для связи можно найти на сайте: www.905505.ru