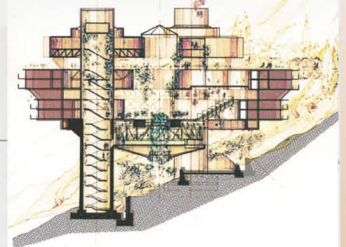


СТРОИТЕЛЬНЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ



Железобетонный
свод



Декоративный
потолок

$D_1 = 35,2\text{ м}$

Н.В. Канчели

СТРОИТЕЛЬНЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Издание третье переработанное и дополненное

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов РФ
по образованию в области строительства в качестве
учебного пособия для студентов, обучающихся
по направлению 653500 - "Строительство"*



Издательство Ассоциации строительных вузов
Москва 2008

УДК 624

Рецензенты:

профессор кафедры архитектуры МГСУ, д.т.н.
Т.Г. Маклакова
академик РААСН, заслуженный деятель науки, профессор, д.т.н.
В.А. Ильичев

Канчели В.Н.

Строительные пространственные конструкции: Издание второе переработанное и до-полненное. Учебное пособие. - М.: Издательство АСВ, 2008. - 128 стр.

ISBN 978-5-93093-206-9

Книга содержит информацию и приближенный расчет широкого круга пространственных строительных конструкций.

Книга поможет проектировщикам ознакомиться с конструктивными особенностями различных систем и выбрать наиболее подходящую из них для конкретного архитектурно-функционального назначения объекта.

Книга предназначена для широкого круга проектировщиков и студентов строительных ВУЗов.

УДК 624

ISBN 978-5-93093-206-9

© Издательство АСВ, 2008
© Канчели Н.В., 2008

К ЧИТАТЕЛЯМ

Книга, которую Вы раскрыли, носит, казалось бы, утилитарный характер: в задачу автора входили «увеличение объёма информации и приближенный расчёт широкого круга строительных конструкций». Другими словами, книга должна помочь начинающему инженеру или студенту соприкоснуться с миром пространственных конструкций и по возможности понять его.

Таково от книги первое впечатление. Правильнее же её понимать как исповедь инженера, посвятившего свою жизнь поиску и воплощению «логичных конструкций». Эта формулировка, придуманная автором, даёт повод читателю самому расшифровать её. Самому потому, что «логичная конструкция» в книге неотделима от личности Н. В. Канчели, а ему объяснять, что такое конструктивная логика – это значит выявить свою сущность, а этим заниматься не всегда хочется. Автору и так всё ясно. А как быть читающим? Надо вникать в суть каждого авторского решения, за которым выбор несущей конструкции для того или иного сооружения. И тогда многое станет ясным. В том числе, что конструкция – часть целого, часть архитектурного произведения. Как часть она менее значима, чем сооружение в целом, но, вместе с тем, конструкция определяет его целостность, и потому её значение вырастает до масштаба целого объекта. Конструкция – материально оформленный смысл сооружения, одухотворённый авторским талантом. Станет, наконец, понятным, что логичная конструкция – это конструкция рациональная, поскольку материала в ней столько, сколько необходимо. Ни больше, ни меньше.

Конструкции, сочинённые автором, дают возможность осознать, что поиски рациональной, логичной конструкции – основной принцип работы инженера, смысл его деятельности, которая связывает рациональность с эстетикой, логику инженера - с художественной утончённостью архитектора.

В книге автор подробно показывает работу инженера на начальных стадиях проекта. Именно в это время особенно ярко проявляется его способность нестандартно мыслить, находить решения в сложных ситуациях, главное – увидеть в начальных набросках будущую конструкцию, оптимально, то есть с наименьшими затратами, воспринимающую внешние воздействия, почувствовать «игру сил» в ней и конструктивными приёмами «втаскать» её в структуру здания.

Поэтому важнейшие качества, которые отличают хорошего конструктора от заурядного – врожденная способность к анализу профессиональных предчувствий, интуитивное понимание работы конструкции – всё то, что предшествует сначала приближенным, а затем точным компьютерным расчетам.

Н.В. Канчели одарён свыше этими качествами. Он блестяще использует их в своих работах, а теперь ещё хочет донести свой опыт и знания до собратьев по профессии, приобщающихся к сочинению пространственных конструкций. Остаётся пожелать читателям интересного чтения, а Н.В. Канчели - новой книги, в которой будут представлены новые проекты, время осуществления которых не за горами.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----------|
| К читателям..... | 3 |
| Предисловие автора..... | 6 |
| ВВЕДЕНИЕ..... | 7 |
| § 1. О специальности «Строитель»..... | 7 |
| § 2. Геометрия поверхностей..... | 9 |
| § 3. Причины эффективности большепролетных оболочечных систем..... | 12 |
| Раздел А. ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ..... | 14 |
| Глава I. ОБОЛОЧКИ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ГАУССОВОЙ КРИВИЗНЫ..... | 14 |
| § 1. Оболочки вращения..... | 14 |
| § 2. Оболочки на эллиптических планах..... | 18 |
| § 3. Оболочки на прямоугольных планах..... | 23 |
| § 4. Оболочки на сложных планах..... | 23 |
| § 5. О причине обрушения аквапарка в Ясенево..... | 27 |
| Глава II. ОБОЛОЧКИ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ГАУССОВОЙ КРИВИЗНЫ..... | 31 |
| § 1. Оболочки в форме гиперболического параболоида на прямоугольном плане..... | 31 |
| § 2. Оболочки в форме гиперболического параболоида на ромбическом плане..... | 36 |
| Глава III. ОБОЛОЧКИ НУЛЕВОЙ ГАУССОВОЙ КРИВИЗНЫ (ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ)..... | 42 |
| Глава IV. ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ МОНОЛИТНЫХ ЗДАНИЙ ТИПА «Сотовый монолит»..... | 47 |
| Глава V. ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ МАЛЫХ АРХИТЕКТУРНЫХ ФОРМ..... | 56 |
| Раздел Б. СТАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ..... | 60 |
| Глава I. ТОНКОЛИСТОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ..... | 60 |
| § 1. Особенности мембранных оболочек..... | 60 |
| § 2. Пологие мембранные оболочки на эллиптических планах..... | 62 |
| § 3. Квазицилиндрические оболочки на прямоугольных планах..... | 69 |
| § 4. Кольцевые мембранные оболочки..... | 75 |
| Глава II. ВИСЯЧИЕ СТЕРЖНЕВЫЕ СИСТЕМЫ..... | 78 |
| § 1. Вантовые системы..... | 78 |
| § 2. Ортогональные вантовые системы отрицательной Гауссовой Кривизны на эллиптическом плане..... | 81 |

| | |
|---|------------|
| § 3. Вантовые системы со стабилизацией с помощью железобетонной скорлупы..... | 84 |
| § 4. О причине обрушения Бауманского рынка..... | 88 |
| § 5. Ортогональные вантовые системы на прямоугольных планах..... | 88 |
| § 6. Стальные висячие решетчатые цилиндрические оболочки..... | 90 |
| § 7. Вантовая конструкция для монтажа купола Храма Христа Спасителя..... | 93 |
| Глава III. СЕТЧАТЫЕ, СТАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ..... | 96 |
| § 1. Особенности сетчатых конструкций..... | 96 |
| § 2. Сетчатые оболочки на эллиптических планах..... | 98 |
| § 3. Сетчатые кольцевые оболочки и башни..... | 99 |
| § 4. Радиально-кольцевые стержневые оболочки..... | 105 |
| Глава IV. ПОКРЫТИЕ СТАРОГО ГОСТИНОГО ДВОРА ВГ. МОСКВЕ.... | 107 |
| Раздел В. ТЕНТОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ | 111 |
| Раздел Г. Компьютеризация проектирования оболочек | 116 |
| Заключение | 120 |
| Список использованной литературы | 122 |

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

С появлением персональных компьютеров резко изменился набор информации, которым должен обладать конструктор для принятия оптимальных решений при выборе конструкции и её разработке. В докомпьютерную эпоху существовали только ручные расчеты весьма ограниченного круга пространственных конструкций. В основном это были оболочки, поверхность которых описывалась простыми уравнениями. Для выполнения этих расчетов проектировщик должен был обладать глубокими и широкими теоретическими знаниями. Расчеты более сложных систем были практически невыполнимы, а, следовательно, их нельзя было запроектировать и построить. Компьютер позволяет рассчитывать любую систему. Таким образом, компьютер многократно расширил область возможного при проектировании пространственных систем.

Конструктор, желающий заниматься проектированием зданий с применением пространственных систем, должен уметь выбрать из множества возможных систем оптимально удовлетворяющую требованиям функции и архитектуры сооружения, а также достаточно экономичную. Для этого он должен обладать информацией о работе широкого круга конструкций и методах их приближенного расчета. Умение же выполнять аналитические расчеты достаточной степени точности с появлением компьютера от него не требуется. Расчет конструкции любой сложности выполнит компьютер.

Предлагаемая книга, содержащая информацию о геометрии и статике широкого набора классов конструкций и методах их приближенного ручного расчета, призвана расширить кругозор проектировщика.

Книга рассчитана на читателя, знакомого с математикой и теоретическими дисциплинами в объеме курса строительных ВУЗов. Многие утверждения и доказательства даны без должной строгости, благодаря чему удастся довести до читателя достаточно глубокие идеи работы широкого круга пространственных систем в весьма сжатой форме, не загружая его сложными выкладками.

Такое изложение, по мнению автора, резко расширит круг студентов и инженеров, которым она может принести пользу.

Студенты архитектурных вузов и работающие архитекторы, прочитав в предлагаемой книге только выделенные абзацы, смогут слегка заглянуть в мир пространственных систем.

Автор выражает глубокую благодарность своему товарищу, доктору технических наук Николу Николаевичу за внимательное прочтение книги и сделанные замечания, своему другу и однокашнику Юрию Самуиловичу Тимянскому, профессору МИСИ, за оказание помощи при написании книги, а также приносит глубокую благодарность своим учителям, старшим товарищам и соратникам, внесшим неоценимый вклад в формирование автора как инженера-конструктора и в реальное воплощение многих сооружений: Петру Леонтьевичу Пастернаку, Асиру Абрамовичу Левенштейну, Виктору Викторовичу Ханджи, Эдуарду Натановичу Кузнецову, Алексею Петровичу Морозову, Олегу Александровичу Курбатову, Исааку Григорьевичу Людковскому, Виктору Ивановичу Трофимову, Георгию Константиновичу Хайдукову, Павлу Георгиевичу Еремееву, Константину Николаевичу Илленко, Владимиру Ильичу Травушу, Евгению Николаевичу Владимирову, Борису Марковичу Гурьевичу, Михаилу Дмитриевичу Филиппову, Николаю Алексеевичу Короленко, Юрию Сергеевичу Рузякову, Михаилу Исааковичу Кельману, Михаилу Михайловичу Митюкову.

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. О специальности «Строитель»

Эстетика строительства.

Создателем архитектурных сооружений, теперь уже в далеком прошлом, был зодчий. Он определял объемно – планировочную композицию, удовлетворяющую функциональному назначению объекта, разрабатывал конструкцию и детали сооружения, находил пропорции элементов здания и его цветовое решение и, более того, выступал организатором строительства.

Развитие строительного производства разделило функции зодчего на три основных составляющих – архитектора, конструктора и строителя, занимающихся решением различных задач архитектуры и строительства.

Такое разделение приводило зачастую к плохому взаимопониманию специалистов, делающих общее дело.

Архитектор часто считает конструктора ремесленником и не желает понимать требований конструктивной логики. Конструктор, в свою очередь, зачастую не хочет считаться с разумными требованиями архитектора. Эта проблема взаимоотношений главных участников проектирования может быть решена только воспитанием у архитекторов понимания общих принципов работы конструкций, а у конструкторов – понимания основных принципов гармонии при создании искусственных пространств.

Любое творение рук человеческих, кроме, пожалуй, чистого искусства (музыки, живописи и т.д.), может быть оценено по трем основным характеристикам: степень удовлетворения функциональному назначению изделия или сооружения, его стоимость и красота.

Степень удовлетворения функции и стоимость достаточно понятны (удобные и дешевые стул, лопата, дом и т.д.). Красота же объекта, по мнению автора, есть ощущение человека, воспринимающего гармонию окружающего мира, которая в свою очередь отражает законы материального мира.

Красота океанских волн – это в каждое мгновение абсолютное подчинение их законам аэрогидродинамики и гравитации; золотая пропорция в архитектуре, как доказано, отражает некоторые глубинные закономерности природы, которой подчиняются многие явления.

Эстетика сооружения складывается из гармонии пропорций и цветового решения, а также из воспринимаемой логичности конструктивного решения. У сооружений типа телебашен, мостов, залов с большепролетными покрытиями и т. д. основную лепту в эстетику вносит конструктивная логика.

Логичная конструкция практически всегда красива и экономична. Эта связь красоты и экономичности - важнейшее свойство конструкций.

Настоящим произведением строительного искусства сооружение становится, когда в нем гармонично все: функция, пропорции, цвет и логичная конструкция.

Некоторые аспекты развития проектирования и строительства.

Процесс проектирования конструкций можно разбить на несколько последовательных составляющих: замысел, расчет конструкции, конструирование.

Первая компонента зависит от таланта, профессионального мастерства и эрудиции автора; вторая – от уровня развития теории расчета сооружений и уровня теоретической подготовки автора; третья – от возможностей строительной индустрии.

Все компоненты проектирования строительных конструкций плавно развивались вплоть до 70-х годов 20-го века – начала эры широкой компьютеризации.

Талантливые и эрудированные инженеры существовали всегда, а общий уровень строительной науки и производства неуклонно совершенствуется.

До внедрения компьютеров расчеты необходимо было выполнять, решая уравнения строительной механики и теории упругости. Эти уравнения в замкнутом виде или приближенными методами решались только для самых простых систем: стержневых конструкций, оболочек простой формы (поверхности второго порядка, оболочки вращения), простых плитных систем и т.д.

Системы сложной формы с геометрически и физически нелинейной работой, с участками нарушения принципов безмоментности рассчитывались лишь приближенно.

Многие конструкции появились благодаря совершенствованию строительной индустрии.

С начала 70-х годов в процесс проектирования стремительно ворвался компьютер, который не только помогает выполнить расчет сооружения, но и открыл новые возможности для творческих фантазий автора. Компьютерные методы позволяют рассчитать конструкцию самой произвольной формы. Однако автор считает, что приближенный расчетный анализ конструкций является необходимым при разработке проекта.

Так была открыта дорога для создания огромного разнообразия новых конструктивных систем.

С помощью нелинейных программных средств стало возможным формировать оптимальные поверхности оболочек над сооружениями любых планов, моделировать с высокой степенью точности процесс испытания конструкции с учетом деформаций, возникновения разрушений и изменения жесткости конструкций, доводя ее до виртуального разрушения. Это позволило определять надежность систем и частично отказаться от испытания моделей и натурных испытаний.

Перспективы развития конструктивных систем, по мнению автора, связаны в основном с двумя аспектами: созданием новых строительных материалов, а также сокращением разрыва между современными возможностями компьютера и способностью конструктора их использовать.

Трудно себе представить, насколько расширились бы возможности строительства и упростилось конструирование, если бы, например, появился материал с прочностью на сжатие и растяжение около 200 кгс/см² по всем направлениям, упругий, с объемным весом около 500 кг/см³, не подверженный коррозии, несгораемый и легко формируемый при строительстве.

Значительную часть плит, балок, стен зданий, оболочек можно было бы изготавливать из этого материала без армирования. Материал с такими свойствами – это мечта, к которой надо стремиться.

Здания из такого материала или монолитного железобетона можно конструировать как единую пространственную систему.

Очевидно, в будущем такой подход к проектированию сооружений из монолита должен стать нормой, что приведет к созданию новой архитектуры.

Компьютерная оптимизация пространственных покрытий с подчинением формы их поверхности перекрываемым планам сооружений позволит расширить область применения оболочек и повысить их архитектурную выразительность.

Современному конструктору нет необходимости обладать умением точного ручного расчета конструкций, но он должен знать основные законы статики и динамики, чувствовать «игру» сил в сооружении, знать принципы работы разнообразных конструктивных систем и уметь оценить результаты расчета. Не зная, к примеру, принципа работы оболочки в форме гиперболического параболоида, мембранных оболочек и других пространственных конструкций, инженер-конструктор не сможет применить их в нужный момент.

Настоящая книга призвана решить проблему расширения кругозора инженера-конструктора и архитектора.

§ 2. Геометрия поверхностей

Пусть поверхность S в окрестности точки « O » обладает некоторыми критериями гладкости.

Через точку « O » проведена нормаль « n » к поверхности и касательная плоскость « P ». Через нормаль « n » проведем плоскость « N » нормальную к поверхности S и касательной к ней плоскости « P ».

Плоскость « N » рассекает поверхность S по кривой L и касательную плоскость по прямой l (рис. 1.)

Если плоскость N вращать вокруг нормали « n », то каждому положению плоскости N на поверхности S и на плоскости P будет соответствовать некоторая кривая L и прямая l .

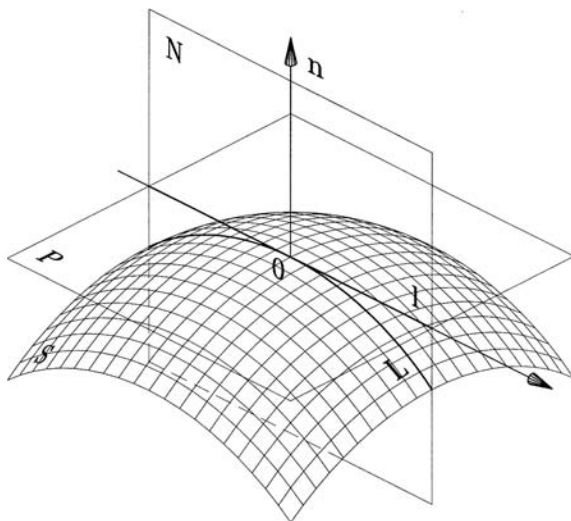


Рис. 1

Кривые L , как и поверхность S , обладают некоторыми критериями гладкости и имеют неравные 0 радиусы кривизны R в точке O . Кривизна кривой K – есть обратная величина радиуса кривизны

$$K = \frac{1}{R}$$

При вращении плоскости N вокруг нормали « n » центры кривизны кривых L перемещаются и могут переходить с одной стороны плоскости P на другую. Считаем, что радиусы кривизны кривых L при этом меняют знак с «+» на «-».

Произведем следующее построение. В плоскости P по направлению каждой прямой l отложим корень квадратный из радиуса кривизны (\sqrt{R}) кривой L .

Полученные кривые в касательной плоскости P для любых гладких поверхностей будут только трех типов: эллипс (рис. 2.), гипербола (рис. 3.) и пара параллельных прямых (рис. 4.). Эти кривые называются индикатрисами Дюпена.

Поскольку эллипс, гипербола и пара параллельных прямых описываются уравнениями второго порядка и имеют по две ортогональные оси симметрии, то радиусы кривизны поверхности по этим направлениям называются главными радиусами R_1 и R_2 .

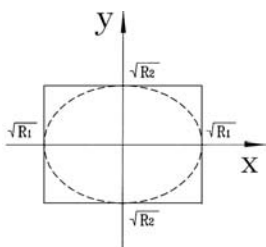


Рис. 2

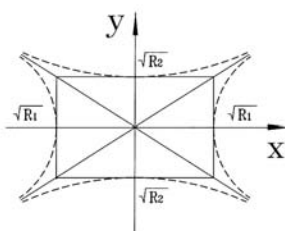


Рис. 3

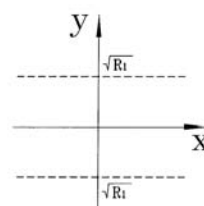


Рис. 4

Гаусс ввел для поверхностей новое понятие: Гауссовой кривизны:

$$\Gamma = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{1}{R_2}.$$

Для поверхностей с индикатрисой Дюпена в виде эллипса (рис. 2.) очевидно, что R_1 и R_2 имеют один знак и, следовательно, Гауссова кривизна таких поверхностей положительна $\Gamma > 0$.

Для поверхностей с индикатрисой Дюпена в виде гиперболы (рис. 3.) очевидно, что главные радиусы кривизны имеют разные знаки, т.е. их разделяет асимптотические направления гипербол, где кривизна равна 0.

Таким образом, для поверхностей с индикатрисой Дюпена в виде 4-х ветвей гиперболы Гауссова кривизна отрицательна $\Gamma < 0$.

Для поверхностей с индикатрисой Дюпена в виде 2-х параллельных прямых (рис. 4.) очевидно, что один из главных радиусов кривизны равен ∞ и, следовательно, Гауссова кривизна равна «0» $\Gamma = 0$.

Таким образом:

- все множество гладких поверхностей, даже не имеющих математического описания, распадается на 3 класса: положительной Гауссовой кривизны, отрицательной Гауссовой кривизны и нулевой Гауссовой кривизны;
- на всех поверхностях в любой точке существует два ортогональных направления, где кривизна поверхности достигает максимума и минимума;
- на поверхностях положительной Гауссовой кривизны отсутствуют направления с нулевой кривизной, т.е. на поверхности отсутствуют прямые линии и она лежит по одну сторону от касательной плоскости (рис. 5.);

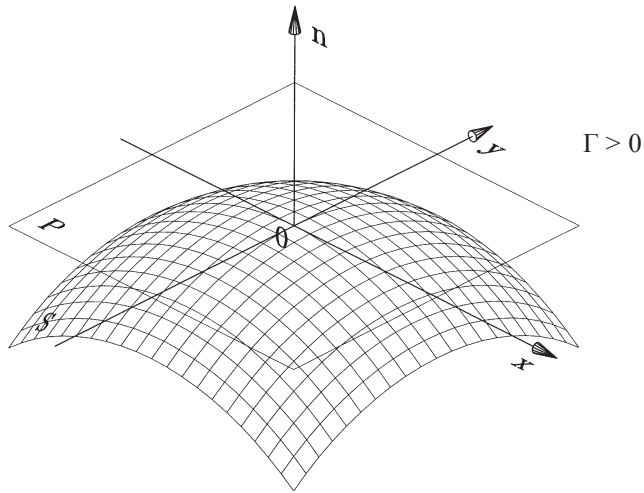


Рис. 5

- на поверхностях отрицательной Гауссовой кривизны через любую точку проходят две прямые, лежащие на поверхности, а поверхность этими прямыми разделяется на зоны, лежащие по разные стороны от касательной плоскости (рис.6.);

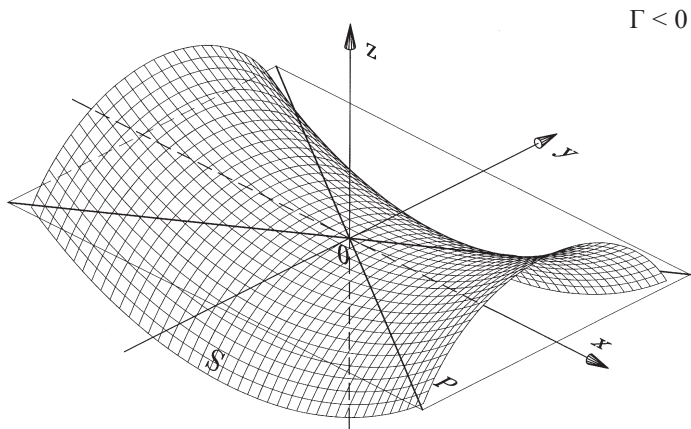


Рис. 6

- на поверхностях нулевой Гауссовой кривизны через любую точку поверхности проходит одна прямая, лежащая на поверхности, а вся поверхность лежит по одну сторону от касательной плоскости.

Поверхность нулевой кривизны разворачивается в плоскость (рис. 7.).

Оболочки, выполненные в форме поверхностей положительной, отрицательной и нулевой кривизны, имеют принципиальные отличия по своей работе под нагрузкой и требуют совершенно различных способов конструирования.

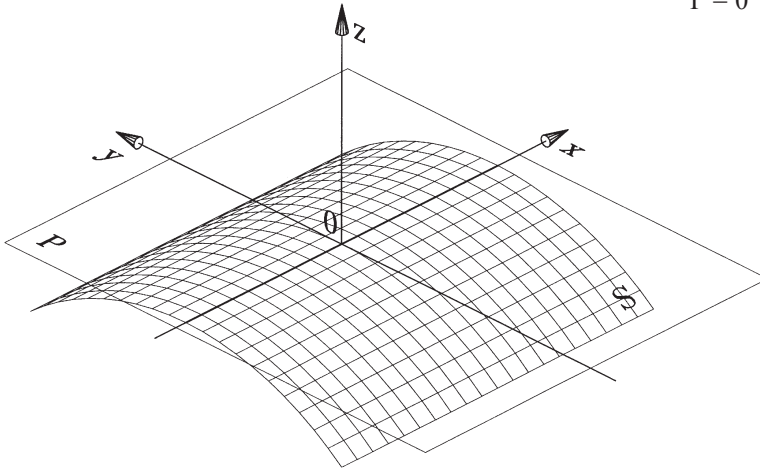


Рис. 7

§ 3. Причины эффективности большепролетных оболочечных систем

Основной причиной экономичности оболочек и возможности перекрытия больших пролетов по сравнению с плоскими системами является безмоментность работы плиты оболочки.

Плоская изгибаемая плита толщиной 10 см может перекрыть пролет около 5 м.

Оболочка, например, купол, толщиной 10 см может перекрыть десятки метров.

Любая конструкция, перекрывающая пролет, воспринимает изгибающий момент внешних сил усилиями растяжения и сжатия в ее элементах, умноженными на плечо внутренней пары усилий.

На рис. 8 видно, что плечо внутренней пары плоской плиты есть часть ее толщины, т.е. несколько сантиметров, а в куполе или в арке плечо есть строительная высота конструкции, т.е. несколько метров. Соответственно, при том же порядке усилий и толщинах плит в оболочке и плите, оболочка может перекрывать в десятки раз большие пролеты.

Для создания экономичной оболочки необходимо добиться, чтобы в поле ее плиты не возникали даже небольшие по величине изгибающие моменты.

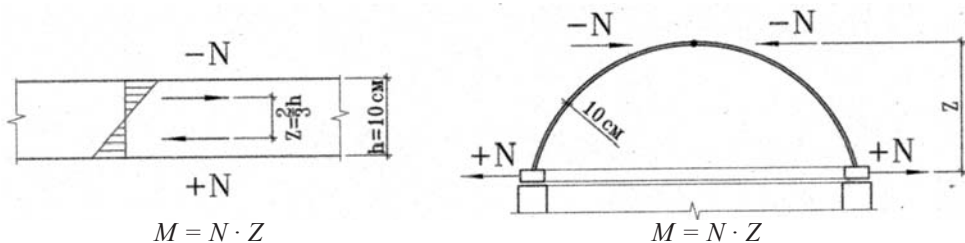


Рис. 8

Учебное издание

Канчели Нодар Вахтангович

СТРОИТЕЛЬНЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Издание третье переработанное и дополненное

Редактор: *О.А. Таранова*
Дизайн обложки: *В.С. Падалко*
Компьютерная верстка: *Ю.В. Козлова, В.С.Падалко*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98. Сдано в набор 10.03.2003.
Подписано к печати 30.01.2008. Формат 70х100/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. 7,5 п. л. Тираж 1000 экз. Заказ № .

Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ)
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, оф 511
тел., факс: 183-56-83
e-mail: iasv@mgsu.ru