

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования  
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Ж. Г. КОНЦЕДАЕВА**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ**

Учебно-методическое пособие – локальный электронный методический материал  
по изучению дисциплины для студентов, обучающихся в магистратуре  
по направлению подготовки 08.04.01 Строительство

Профиль программы «Проектирование объектов промышленного  
и гражданского строительства»

Калининград  
2023

УДК 69.07

Рецензент

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительства ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» Л. В. Узунова

**Концедаева, Ж. Г.** Проектирование пространственных металлических конструкций: локальный электронный методический материал по изучению дисциплины для студентов, обучающихся в магистратуре по направлению подготовки 08.04.01 Строительство (профиль Проектирование объектов промышленного и гражданского строительства) / **Ж. Г. Концедаева.** – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2023. – 26 с.

В учебно-методическом пособии представлены методические материалы по изучению дисциплины «Проектирование пространственных металлических конструкций», включающие тематический план занятий с перечнем ключевых тем лекционного курса, а также тем практических занятий, методические указания и вопросы для самоконтроля, а также оценочные средства и критерии оценивания.

Список лит. – 8 наименований

Локальный электронный методический материал. Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины. Рекомендовано для использования в учебном процессе методической комиссией института морских технологий, энергетики и строительства ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» 28.06.2023 г., протокол № 10

УДК 69.07

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет», 2023 г.  
© Концедаева Ж. Г., 2023 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ЗАНЯТИЯМ .....	7
ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН ЗАНЯТИЙ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО КУРСА .....	8
Тема № 1. Тонкостенные пространственные строительные конструкции.....	8
Тема № 2. Расчет и конструирование оболочек вращения. ....	10
Тема № 3. Расчёт тонкостенных оболочек по безмоментной теории. Купол....	11
Тема № 4. Учет краевого эффекта. Особенности конструирования куполов....	13
Тема № 5. Длинные и средние цилиндрические оболочки и складки. Сущность расчета по безмоментной теории.....	14
Тема № 6. Понятие о покрытиях висячего типа.....	15
ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ.....	16
Занятие №1. «Построение криволинейных поверхностей» .....	16
Занятие №2. «Сбор нагрузок. Определение внутренних усилий, действующих в оболочках, аналитическими методами» .....	19
Занятие №3. «Расчет сферического купола на осесимметричную нагрузку по безмоментной теории».....	20
Занятие №4. «Расчет сетчатой оболочки в форме пологого гипара на прямоугольном плане с квадратной сеткой».....	23
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	24
Библиографический список.....	25

## ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Проектирование пространственных металлических конструкций» относится к части, формируемой участниками образовательных отношений, и является дисциплиной по выбору.

Целью изучения дисциплины «Проектирование пространственных металлических конструкций» является формирование компетенций в области основ проектирования пространственных металлических конструкций, отвечающих современным требованиям технического прогресса в области промышленного и гражданского строительства.

В результате освоения дисциплины студент должен:

### Знать:

- классификацию пространственных металлических конструкций, область их применения и предъявляемых к ним требования;
- основные положения проектирования и конструирования пространственных металлических систем;
- основные технико-экономические показатели пространственных металлических конструкций и пути их оптимизаций.

### Уметь:

- применять пространственные металлические конструкции в конкретных объектах проектирования в соответствии с функциональными, технико-экономическими и композиционными требованиями к объекту проектирования;
- анализировать напряженное состояние и распределение внутренних усилий в конструкции с целью выявления возможных и оптимальных вариантов решения в объекте проектирования.

### Владеть:

- навыками расчета и конструирования пространственных металлических конструкций зданий и сооружений.

Для оценки результатов освоения дисциплины используются:

- оценочные средства текущего контроля успеваемости;
- оценочные средства для промежуточной аттестации по дисциплине.

К оценочным средствам текущего контроля успеваемости относятся:

- задания для практических занятий;
- задания к контрольной работе (для студентов заочной формы обучения);
- тестовые задания по дисциплине.

Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в форме дифференцированного зачета (зачет с оценкой). Студенты получают оценку по результатам текущего контроля успеваемости при условии выполнения и успешной защиты практических заданий, контрольной работы (для заочной формы обучения) по расчету заданной пространственной конструкции, и по результатам тестирования. Оценка по дисциплине выставляется в зависимости от уровня освоения студентом тем дисциплины в соответствии с критериями, указанными в таблице 1.

Таблица 1– Система оценок и критерии выставления оценки

Система оценок Критерий	2	3	4	5
	0-40 %	41-60 %	61-80 %	81-100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
	«не зачтено»	«зачтено»		
<b>1 Системность и полнота знаний в отношении изучаемых объектов</b>	Обладает частичными и разрозненными знаниями, которые не может научно-корректно связывать между собой (только некоторые из которых может связывать между собой)	Обладает минимальным набором знаний, необходимым для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает набором знаний, достаточным для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает полнотой знаний и системным взглядом на изучаемый объект
<b>2 Работа с информацией</b>	Не в состоянии находить необходимую информацию, либо в состоянии находить отдельные фрагменты информации в рамках поставленной задачи	Может найти необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, интерпретировать и систематизировать необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, систематизировать необходимую информацию, а также выявить новые, дополнительные источники информации в рамках поставленной задачи
<b>3. Научное осмысление изучаемого явления, процесса,</b>	Не может делать научно корректных выводов из имеющихся у него сведений, в	В состоянии осуществлять научно корректный анализ предоставлен-	В состоянии осуществлять систематический и научно корректный	В состоянии осуществлять систематический и научно-корректный

Система оценок Критерий	2	3	4	5
	0-40 %	41-60 %	61-80 %	81-100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
	«не зачтено»	«зачтено»		
<b>объекта</b>	состоянии проанализировать только некоторые из имеющихся у него сведений	ной информации	анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные задачи данные	анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные поставленной задаче данные, предлагает новые ракурсы поставленной задачи
<b>4. Освоение стандартных алгоритмов решения профессиональных задач</b>	В состоянии решать только фрагменты поставленной задачи в соответствии с заданным алгоритмом, не освоил предложенный алгоритм, допускает ошибки	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом, понимает основы предложенного алгоритма	Не только владеет алгоритмом и понимает его основы, но и предлагает новые решения в рамках поставленной задачи

*Задание для выполнения контрольной работы* для студентов заочной формы обучения размещается в ЭИОС (электронно-информационная образовательная среда) университета. Выполненная и оформленная контрольная работа сдается преподавателю на проверку до начала проведения промежуточной аттестации. В случае, если работа имеет недостатки, она отправляется на доработку; при отсутствии замечаний к выполненной контрольной работе - допускается к защите.

Структура учебно-методического пособия представлена тематическим планом изучаемой дисциплины, содержащим: методические рекомендации для самостоятельной работы студентов по изучению дисциплины; план теоретических занятий; план практических занятий; список рекомендованной литературы.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ЗАНЯТИЯМ

Самостоятельная работа студентов – это планируемая работа, выполняемая по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия, является одним из основных видов деятельности обучающихся. Самостоятельная работа студентов включает в себя изучение лекционного материала и первоисточников, подготовку к практическим занятиям и сообщения, выступления на групповых занятиях, другие задания преподавателя. Целью самостоятельных занятий является более глубокое изучение студентами отдельных вопросов курса с использованием рекомендуемой дополнительной литературы и других информационных источников.

Задачами самостоятельной работы обучающихся являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умения использовать нормативную и справочную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов, творческой инициативы, ответственности и организованности.

Основными формами внеаудиторной самостоятельной работы при изучении дисциплины являются:

- изучение программного материала дисциплины (работа с учебником и конспектом лекций);
- изучение и конспектирование рекомендуемых источников;
- просмотр рекомендуемых обучающих видеофильмов и роликов по ссылкам в сети Internet;
- работа с электронными информационными ресурсами (ЭИОС КГТУ) и ресурсами Internet;
- выполнение тестовых заданий и решение задач;
- подготовка презентаций;
- поиск (подбор) литературы (в том числе электронных источников информации) по заданной теме;
- подготовка к занятиям, проводимым с использованием активных форм обучения;
- участие в интернет-конференциях.

Университет обеспечивает учебно-методическую и материально-техническую базу для организации самостоятельной работы студентов. Библиотека университета обеспечивает:

- учебный процесс необходимой литературой и информацией (комплектует библиотечный фонд учебной, методической, научной, периодической и справочной литературой в соответствии с учебным планом и программами, в том числе на электронных носителях);

- доступ к основным информационным образовательным ресурсам, информационной базе данных, в том числе библиографической, возможность выхода в Интернет.

Учебные программы раскрывают рекомендуемый режим и характер различных видов учебной работы (в том числе самостоятельной работы над рекомендованной литературой). Для подготовки к занятиям, текущему контролю и промежуточной аттестации обучающиеся могут воспользоваться электронной библиотекой Университета, где имеется возможность получить доступ к учебно-методическим материалам как этой библиотеки, так и иных электронных библиотечных систем. Также студенты могут взять на дом необходимую литературу на абонементе или воспользоваться читальным залом. Ответы на вопросы, выносимые для самостоятельного изучения (повторения), должны быть кратко законспектированы в тетради для лекций.

При подготовке к практическим занятиям студентам рекомендуется изучить лекционный материал, а также вопросы, выносимые для самостоятельного изучения. При выполнении практических заданий необходимо обратить внимание на использование актуальных нормативных документов, справочной и другой литературы, применяемой размерности в расчетах, обоснования применяемого алгоритма расчетов и формулирование выводов. Выполненная практическая работа должна быть соответствующим образом оформлена в отдельной тетради для практических работ или на отдельных листах формата А4 в текстовом редакторе Word, с использованием графических программ и собранных в отдельную папку.

В начале практического занятия может проводиться тестирование по изучаемой теме продолжительностью до 10 мин.

## **ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН ЗАНЯТИЙ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО КУРСА**

### **Тема № 1. Тонкостенные пространственные строительные конструкции**

*Ключевые вопросы темы:*

1. Общие сведения о тонкостенных пространственных конструкциях.
2. Область применения металлических пространственных конструкций.
3. Геометрия поверхности оболочек.
4. Особенности напряжённого состояния тонкостенных оболочек.

В последние годы возрастает потребность в сооружениях большой вместимости: рынках, спортивных и зрелищных сооружений и т. п. Пролеты таких сооружений могут превышать 100 м, а вместимость—100 тыс. человек. Наиболее экономичными при больших пролетах являются пространственные тонкостенные конструкции (ПТК). Такие конструкции состоят из тонкостенных оболочек, очерченных по криво-



линейным поверхностям или поверхностям многогранников, и контурных элементов, передающих нагрузку от покрытия на колонны или несущие стены.

Тонкостенные оболочки, представляющие собой поверхности вращения – сферы, параболоида, эллипсоида, конуса и др. Оболочки положительной Гауссовой кривизны. Оболочки отрицательной Гауссовой кривизны.

Если поверхность оболочки обладает кривизной в одном или двух направлениях, в оболочках возникают усилия преимущественно одного знака. Изгибающие моменты в большинстве случаев проявляются лишь в ограниченных зонах (например, вблизи контура оболочки), вследствие чего их значение для подбора сечений оболочек существенно меньше, чем в плоских конструкциях. Форма поверхности оболочки выбирается такой, чтобы обеспечить ее работу главным образом на сжатие, при этом материал оболочки используется наиболее эффективно.

Форма срединной поверхности определяет форму и характер напряженно-деформированного состояния оболочки.

Оболочки двоякой кривизны, имеющие выпуклую поверхность на прямоугольном плане: пологие и подъемистые.

В зависимости от соотношения стрелы подъема  $f$  оболочки к меньшему пролету  $l_{min}$  оболочки бывают:

- пологие – применяются чаще всего, причем при любой форме поверхности. В расчётах они взаимозаменяемы (облегчается математическая работа);
- подъемистые –  $f/l_{min} > 1/5$ .

В зависимости от толщины, оболочки  $\delta$  они подразделяются на: толстые (при  $\delta = (1/4 \dots 1/8)l_{min}$ ); тонкие (при  $1/200 l_{min} \leq \delta < 1/8 l_{min}$ ); очень тонкие (при  $\delta < 1/200 l_{min}$ ).

Наибольшее распространение в строительстве получили пологие оболочки, имеющие следующие преимущества:

- поверхность и объем, очерчиваемый пологой оболочкой, меньше, чем у подъемистой;
- изготовление элементов с малой кривизной значительно проще, чем с большой кривизной;
- устройство кровли на пологой поверхности проще, чем на крутых скатах;
- при расчете пологих оболочек могут быть существенно упрощены уравнения их равновесия без заметной потери точности.

Форма поверхности пологих оболочек выбирается:

- из соображений удобства изготовления конструкции;
- легкости монтажа;

- простоты соединения элементов;
- условий унификации (при сборных конструкциях).

Цель занятия: знать классификацию пространственных металлических конструкций, область их применения и предъявляемые к ним требования.

## Тема № 2. Расчет и конструирование оболочек вращения

*Ключевые вопросы темы:*

1. Общие требования к конструированию тонкостенных оболочек.
2. Краткие сведения из теории поверхностей.
3. Построение поверхности.
4. Разбивка тонкостенных конструкций на сборные элементы.
5. Определение размеров и подбор сечений конструктивных элементов.

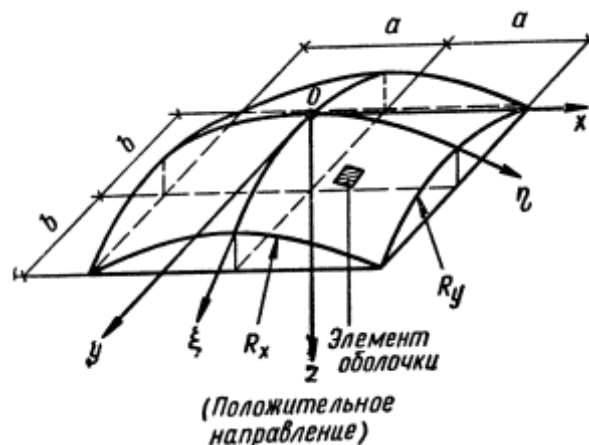
Некоторые положения из геометрии оболочек.

Через произвольную точку  $A(x, y, z)$  на поверхности можно провести бесконечное множество плоских кривых, представляющих линии пересечения поверхности с различными плоскостями. При этом все касательные к этим кривым лежат в касательной плоскости к поверхности в точке  $A$ . Прямая, проведенная через точку  $A(x, y, z)$  перпендикулярно к касательной плоскости, называется нормалью к поверхности в этой точке. Плоскость, проведенная через нормаль к поверхности, называется нормальной плоскостью, а линия ее пересечения с поверхностью - нормальным сечением.

Вращая нормальную плоскость вокруг нормали к поверхности, получим бесконечное множество нормальных сечений, каждое из которых в точке  $A(x, y, z)$  имеет свою кривизну  $\rho=1/R$ , где  $R$  - радиус кривизны поверхности в точке  $A$ . В каждой точке исследуемой поверхности имеются два направления, нормальные сечения по которым образуют экстремальные кривизны; эти направления называются главными, а соответствующие им кривизны - главными кривизнами.

Главные нормальные сечения лежат во взаимно перпендикулярных нормальных плоскостях и характеризуются главными (наибольшими и наименьшими) радиусами кривизны и главными кривизнами поверхности в данной точке.

Оболочки положительной Гауссовой кривизны, оболочки отрицательной Гауссовой кривизны.



Цель занятия: знать основные положения проектирования и конструирования таких пространственных металлических систем, как купола; владеть навыками их расчета и конструирования пространственных металлических конструкций зданий и сооружений.

### Тема № 3. Расчёт тонкостенных оболочек по безмоментной теории. Купол.

*Ключевые вопросы темы:*

1. Конструктивное оформление купола и его использование.
2. Определение усилий в оболочке купола по безмоментной теории.
3. Учет краевого эффекта.

Купол – пространственная конструкция, состоящая из гладкой или ребристой оболочки с вертикальной осью вращения. Купола применяют для покрытий круглых и многоугольных в плане сооружений пролетом до 200 м. Элементами купола являются осесимметричная оболочка вращения и нижнее опорное кольцо, работающее на растяжение. В вершине купола может устраиваться верхнее опорное кольцо, работающее на сжатие. Могут также иметься проемы и отверстия, расположенные на боковой поверхности оболочки. Серединную поверхность рекомендуется принимать в виде поверхности вращения – сферы, параболоида, эллипсоида, конуса и др.

Основными нагрузками, определяющими размеры сечений элементов купола, являются собственный вес конструкций купола и вес снегового покрова. В подъемистых куполах может оказать влияние и ветровое давление.

Тонкостенные оболочки имеют значительную меньшую жесткость на изгиб в сравнении с жесткостью против действия сил, развивающихся в срединной плоскости. Поэтому внешние нагрузки, действующие перпендикулярно срединной поверхности, воспринимаются преимущественно нормальными (в плоскости) и сдвигающими усилиями. Следовательно, в оболочках в основном возникает безмоментное напряженное состояние, а моментное лишь в отдельных зонах – там, где происходит заметное искривление срединной поверхности, в местах приложения сосредоточенных нагрузок и резкого изменения толщины.

На стадии определения конструктивного решения тонкостенного купола применяют приближенные способы расчета. Они дают вполне достоверные результаты, зачастую с точностью выше реальных допусков, практикуемых при подборе сечений элементов купола. В рабочем проектировании пользуются точными методами, ориентированными на реализацию вычислений с помощью компьютера.

Тонкостенные купола можно рассчитывать по безмоментной теории, условиями применения которой являются: плавность изменения толщины оболочки, радиуса кривизны ее меридиана, интенсивности нагрузки; свободное перемещение оболочки в радиальном и кольцевом направлениях. Безмоментное опирание купола по внешнему контуру представляется как непрерывное, шарнирно-подвижное, образуемое стерженьками-опорами, направленными по касательным к меридиональным сечениям оболочки. В этом случае оболочка будет статически определима. При нарушении названных условий напряженное состояние купола должно определяться с учетом действия изгибающих моментов в краевых зонах.

Определение усилий по безмоментной теории. В куполах, не имеющих изломов, резкого изменения толщины оболочки, загруженных равномерно распределенной нагрузкой и имеющих шарнирно-подвижное опирание по контуру, значения изгибающих моментов и поперечных сил незначительны. Поэтому ими можно пренебречь. Основными усилиями будут являться меридиональные усилия  $N_1$ , кольцевые усилия  $N_2$  и касательные усилия  $S$  (рисунки 1 и 2).

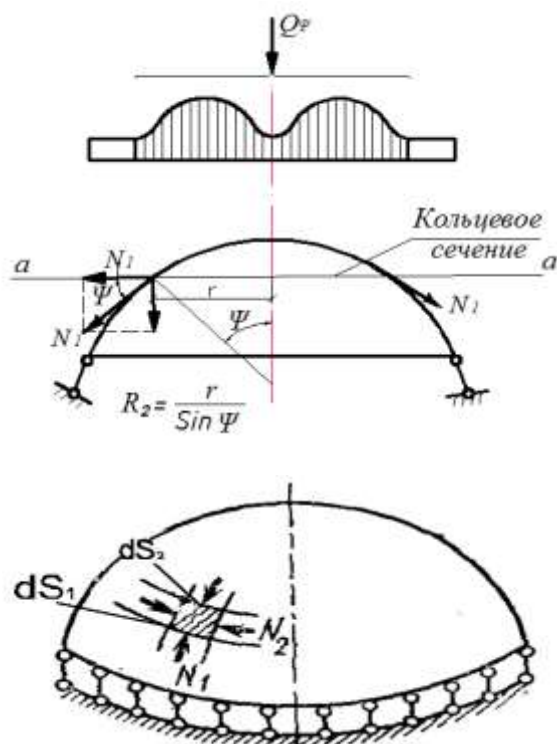


Рисунок 1 - Расчетная схема распределения усилий при осесимметричной нагрузке

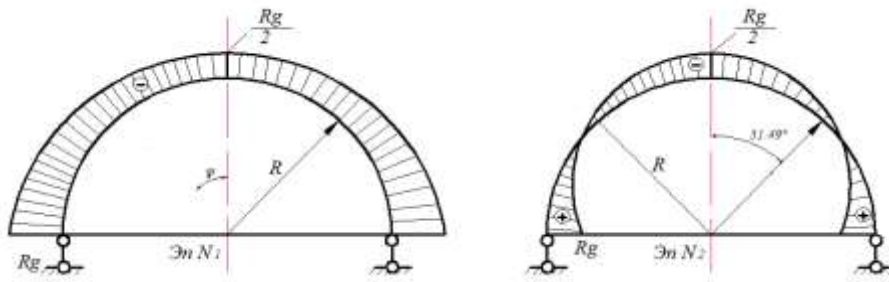


Рисунок 2 - Распределение усилий при постоянной нагрузке

Цель занятия: знать основные положения проектирования и конструирования пространственных металлических систем; владеть навыками их расчета и конструирования пространственных металлических конструкций зданий и сооружений.

#### Тема № 4. Учет краевого эффекта. Особенности конструирования куполов.

Ключевые вопросы темы:

1. Принцип расчета куполов по безмоментной теории
2. Учет сил взаимодействия опорного кольца и оболочки.

При взаимодействии опорного кольца и оболочки возникают изгибающие моменты  $M_0$  и распор купола  $H_0$  определяются по методу сил (рисунок 3).

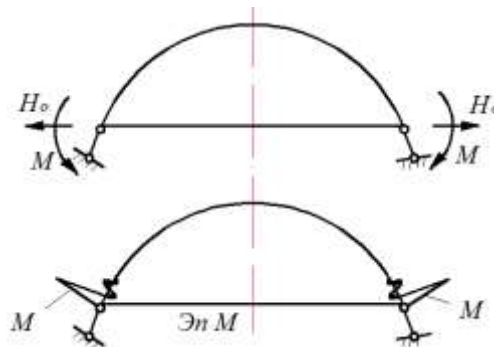


Рисунок 3 – К учету краевого эффекта

а – расчетная схема; б - распределение изгибающих моментов

После определения момента и распора купола из конических уравнений усилия в оболочке купола определяется наложением на безмоментное состояние краевого усилия.

Цель занятия: применять пространственные металлических конструкции в конкретных объектах проектирования в соответствии с функциональными, технико-экономическими и композиционными требованиями к объекту проектирования.

## **Тема № 5. Длинные и средние цилиндрические оболочки и складки.**

*Ключевые вопросы темы:*

1. Особенности расчета по безмоментной теории длинных и средних цилиндрических оболочек и складок.
2. Нагрузка на арочные диафрагмы.
3. Выбор конструктивных размеров перекрытия в плане и высоты конструкции

Конструкция цилиндрических оболочек определяет методы расчета. Цилиндрические оболочки покрытий из цилиндрической плиты, опирающейся вдоль образующей (по криволинейному краю) на диафрагму. Этим оболочка отличается от свода, опирающегося на направляющей, т. е. по прямолинейному краю на опоры, воспринимающие вертикальные и горизонтальные реакции свода. Цилиндрические оболочки делятся на короткие, работающие подобно безмоментному своду, и длинные, работающие (приближенно) как балка корытообразного сечения. В длинной цилиндрической оболочке при равномерной нагрузке поперечное сечение оболочки деформируется как арка. Для уменьшения этой деформации устраивают бортовые элементы, которые могут влиять на вертикальную или горизонтальную составляющую смещения, или же на полное смещение. Выбор типа бортовых элементов зависит от условия краев оболочек, наличия поперечных ребер и т. д.

Диафрагмы оболочек могут представлять собой двутавровую балку переменной высоты с отверстиями для облегчения массы, арку с затяжкой, сегментную ферму, раму с криволинейным ригелем. Они передают нагрузку на поперечные стены или стойки. Принимается, что по линии опирания криволинейного края на диафрагмы изгибающие моменты в оболочке равны нулю (продольные моменты — вследствие шарнирности соединения, поперечные — вследствие абсолютной жесткости диафрагмы). Поперечные силы в этом месте равны нулю вследствие отсутствия моментов; таким образом действуют только усилия безмоментного напряженного состояния, возникающие в срединной поверхности оболочки: продольные поперечные и сдвигающие. Нагрузка может передаваться на диафрагму только усилиями сдвига  $S$ , сумма вертикальных проекций этих усилий равна всей нагрузке, передающейся с оболочки на диафрагму. Таким образом, арочная диафрагма нагружена сдвигающими усилиями по криволинейному поясу и усилия в нем будут отличаться от усилий в обычной арке, нагруженной вертикальной нагрузкой.

Работая в двух взаимно перпендикулярных вертикальных плоскостях, оболочки должны проектироваться с учетом особенностей работы в каждой из этих плоскостей. Так цилиндрическая оболочка в продольном направлении работает как балка с пролетом  $L$ , у которой в нижнем поясе возникают растягивающие усилия, а в верхней части оболочки эти усилия сжимающие. Поэтому конструктивная высота такой оболочки должна быть не менее  $1/10$  пролета  $L$ . В поперечном направлении цилиндрическая оболочка работает как распорная конструкция типа тонкостенной арки с пролетом  $l$  ( $l \leq 1/2 L$ ). Для погашения распора в этом направлении предусматриваются диафрагмы жесткости, устанавливаемые по длине оболочки. Диафрагмы жесткости цилиндрической оболочки выполняются как сплошные стены жесткости, как фермы, вделанные в оболочку как арки с затяжками. В то же время распор, который действует между диафрагмами жесткости, должен быть воспринят так называемым бортовым элементом, который работает как балка в горизонтальной плоскости и переносит распорные усилия на диафрагмы жесткости.

Цель занятия: уметь применять пространственные металлических конструкции в конкретных объектах проектирования в соответствии с функциональными, технико-экономическими и композиционными требованиями к объекту проектирования;

## **Тема № 6. Понятие о покрытиях висячего типа**

*Ключевые вопросы темы:*

1. Вантовые конструкции. Область их применения.
2. Конструктивное оформление вантовых конструкций.

К ним относятся покрытия, образуемые системой вантов, опорным контуром и сборной железобетонной оболочкой. Различают плоскостную систему вантов, когда они располагаются в радиальном направлении или параллельно друг другу, и пространственную систему вантов, работающих в двух направлениях (рисунок 4). В последнем случае ванты в обоих направлениях могут быть несущими (выпуклостью вниз) или же в одном направлении напрягающими (выпуклостью вверх), а в другом — несущими (выпуклостью вниз). Форма поверхности висячего покрытия зависит от характера кривой провисания несущих вантов. Опорный контур покрытия служит для восприятия распора вантов, а также для передачи на опоры вертикальных нагрузок. Элементы оболочки покрытия при монтаже укладывают на ванты, заранее закрепленные в опорных устройствах. Предварительное напряжение вантов производится с помощью монтажной нагрузки (пригрузки) или домкратов.

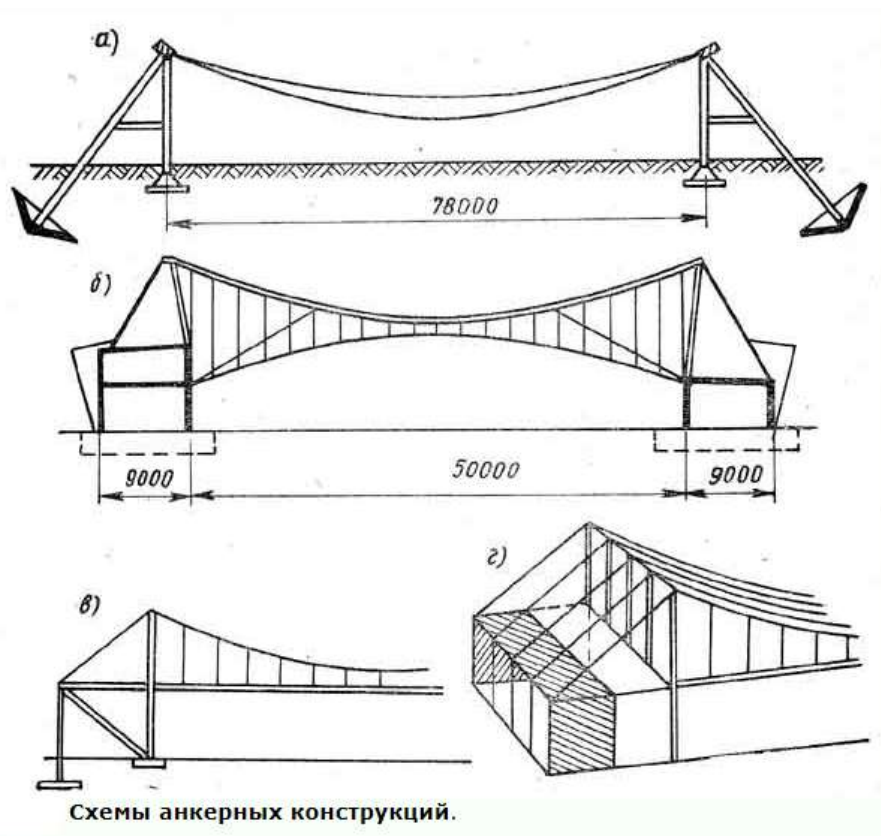


Рисунок 4 – Анкерные конструкции

## ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

### Занятие №1. «Построение криволинейных поверхностей»

Формы разных видов оболочек различаются гауссовой кривизной, которая представляет собой произведение двух взаимно нормальных кривизн  $p_1$  и  $p_2$  рассматриваемой оболочки. Кривизной  $p$  называется, как известно, величина, обратная радиусу кривизны  $R$ :  $p = 1/R$

Интерес при этом представляет знак произведения: при отрицательном знаке оболочки двойкой кривизны имеют прогибы в разные стороны; при положительном — в одну. Помимо гауссовой кривизны различаются оболочки и по способу их геометрического формообразования: способ переноса и способ вращения.

Способ переноса заключается в переносе образующей линии, прямолинейной или криволинейной, вдоль направляющей линии, лежащей в плоскости, перпендикулярной плоскости образующей. Другой способ состоит из вращения образующей вокруг некоторой оси, лежащей в ее плоскости. При этом некоторые поверхности, как, например, цилиндрическая круговая поверхность и поверхность гиперболического параболоида (гипара), могут формироваться как по способу переноса, так и по способу вращения



Цилиндрическая круговая поверхность оболочки может быть получена переносом прямолинейной образующей по круговой направляющей или круговой образующей по прямолинейной направляющей. Все другие виды цилиндрических оболочек — параболические, эллиптические и т. д. — могут быть получены только по способу переноса.

Коническая оболочка формируется вращением прямой- образующей вокруг вертикальной оси, при этом один конец образующей закреплен в некоторой точке на оси вращения, а другой движется по замкнутой кривой, находящейся в плоскости, перпендикулярной оси вращения. Если эту кривую считать направляющей, а прямую— образующей, то формирование конуса происходит по способу вращения.

Поверхность коноидальной оболочки образуется переносом прямой, у которой один конец движется по криволинейной направляющей, а другой — по прямолинейной. Все перечисленные выше поверхности оболочек имеют нулевую гауссову кривизну: так как в сечениях, совпадающих с прямолинейной образующей, один из радиусов кривизны равен бесконечности, сама кривизна равна нулю; следовательно, и произведение обеих кривизн будет равно нулю.

**Задание:** по заданным параметрам создать криволинейные пространственные поверхности в AutoCAD - 3D: оболочки вращения (купол), цилиндрическую оболочку, оболочку двоякой кривизны.

Пример. Создать поверхность вращения Инструмент «Вращать».

Методические рекомендации по выполнению задания:

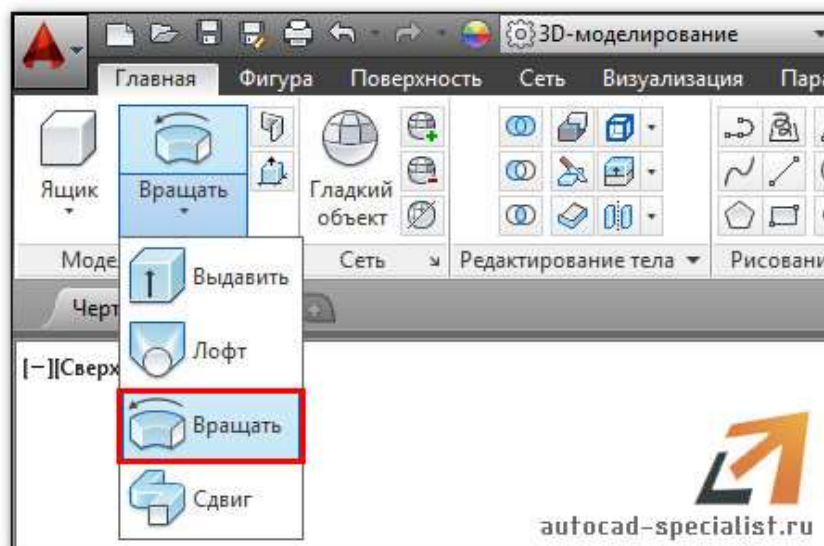
Построение 3d-моделей в AutoCAD с помощью инструмента «Вращать» позволяет создавать тела вращения, в основе которых лежит криволинейная линия. Суть данного принципа проста. Создание 3d-модели в Автокаде сводится к построению линии нужной формы и указанию оси вращения. Для создания оси вращения используется отрезок, а вот линию можно создать с помощью сплайна или полилинии.

Если в качестве профиля вы используете 3D полилинию или 3D сплайн, то убедитесь, что объект был начерчен в одной плоскости. В противном случае команда «Вращать» не выполнится.

Пример выполнения. Создадим профиль произвольной формы, используя сплайн. Для оси вращения создадим отрезок.



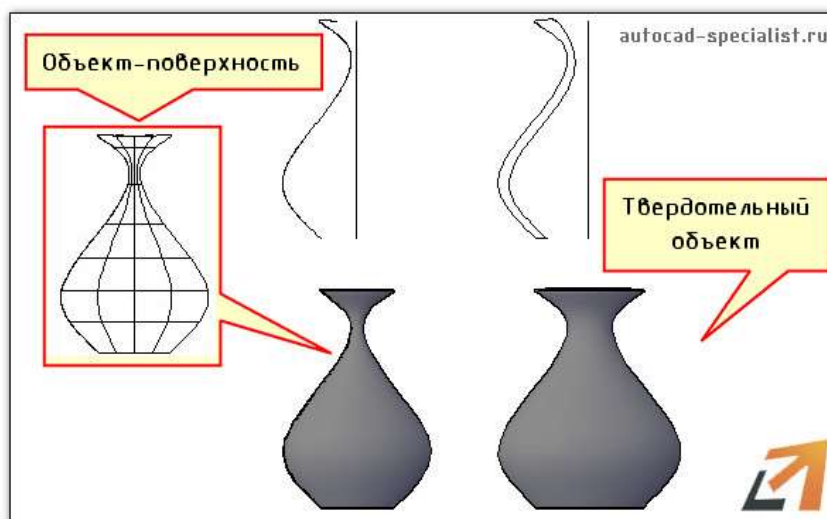
Выберем команду «Вращать» на вкладке «Главная» - панель «Моделирование».



Далее читаем запросы командной строки и пошагово выполняем инструкции:

1. Выбрать объекты для вращения (наш профиль);
2. Указать ось вращения (выбираем по очереди точки отрезка);
3. Задать угол вращения (по умолчанию 3600).

**ПРИМЕЧАНИЕ:** Если профиль будет замкнутый, то в результате выполнения команды «Вращать» получится твердотельный объект. А если в качестве профиля будет выступать незамкнутая криволинейная линия, то получится объект-поверхность (см. рис).



<https://autocad-specialist.ru/video-uroki-autocad/3d-modeli-avtokad-iz-2d-primitivov-chast-2.html>

Создание поверхности смещения. Построить поверхность смещения в Автокад, команда Поверхсмещение

Вызвать команду **Поверхсмещение** в Автокад можно одним из следующих способов:

1. Из строки меню - пункт **Рисование** - строка **Моделирование** - в раскрывающемся списке выбрать строку **Поверхности** - строка **Смещение**.
2. На вкладке **Поверхность** ленты инструментов - в группе **Создать** – кнопка **Поверхность смещения**.
3. На классической панели инструментов **Создание поверхности** - кнопка **Поверхность смещения**.
4. Либо прописать наименование команды в командной строке **Поверхсмещение**.

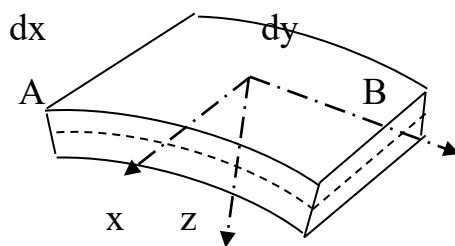
<https://drawing-portal.com/creating-surfaces-in-autocad/surface-offset-in-autocad.html>

Цель занятия: получить навыки построения пространственных металлических конструкций зданий и сооружений.

**Занятие №2. «Сбор нагрузок. Определение внутренних усилий, действующих в оболочках, аналитическими методами»**

Задание: для заданного типа оболочки рассчитать усилия, действующие в элементах поверхности.

Методические рекомендации: необходимо применить основные формулы для расчета внутренних усилий, действующих в оболочках.



Продольные силы

$$N_x = \int_{-0.5h}^{0.5h} \sigma_x dz$$

$$N_y = \int_{-0.5h}^{0.5h} \sigma_y dz$$

Изгибающие моменты

$$M_x = \int_{-0.5h}^{0.5h} z \sigma_x dz$$

$$M_y = \int_{-0.5h}^{0.5h} z \sigma_y dz$$

Цель занятия: уметь определять напряженное состояние и распределение внутренних усилий в конструкции с целью выявления возможных и оптимальных вариантов решения в объекте проектирования.

### Занятие №3. «Расчет сферического купола на осесимметричную нагрузку по безмоментной теории»

Задание: рассчитать усилия, действующие в сечениях купола по безмоментной теории.

Методические рекомендации. В безмоментном напряженном состоянии оболочка купола работает как тонкая мембрана и поэтому подвержена только нормальным усилиям, действующим в ее срединной поверхности. На практике это положение можно принять в отношении всего купола, кроме приопорной зоны, где появляются изгибающие моменты.

Пример выполнения задания. Рассмотрим купол произвольного очертания, двоякая кривизна которого в каждой точке определяется двумя радиусами кривизны  $R_1$  и  $R_2$ .

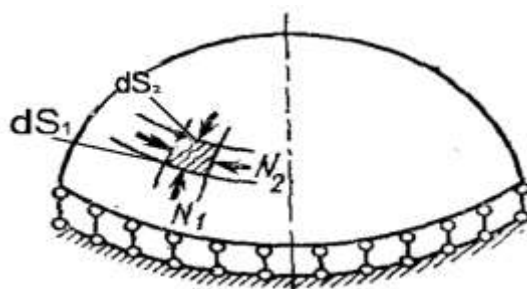


Рисунок 5 – Схема элемента купола

В общем случае элемент оболочки купола, ограниченный двумя меридиональными и двумя кольцевыми сечениями, находится под воздействием нормальных усилий -- меридионального  $N_1$  и кольцевого  $N_2$ , а также касательного усилия  $S$ , отнесенных к единице длины сечения. При загрузке купола осесимметричной нагрузкой (собственный вес, снег на всей поверхности) усилие  $S = 0$ , а усилия  $N_1$  и  $N_2$  определяются из условий статики как функции только угловой координаты  $\varphi$  (широты).

Напряженное состояние купола при осесимметричной нагрузке характеризуется следующим уравнением равновесия:

$$\frac{N_1}{R_1} + \frac{N_2}{R_2} = q_\varphi$$

где  $q_\varphi$  -- нормальная к поверхности купола составляющая внешней нагрузки  $q$  (на  $1 \text{ м}^2$  поверхности купола).

Для определения меридионального усилия  $N_1$  кольцевым горизонтальным сечением отсекается верхняя часть купола и рассматривается ее равновесие.

На отсеченный сегмент действует сжимающая сила  $Q_\varphi$ , которая представляет собой сумму всех нагрузок, приложенных выше рассматриваемого сечения. Исходя из условия  $Y_z=0$ , она должна уравновешиваться меридиональными усилиями  $N_1$  по периметру кольцевого сечения радиуса  $r$ :

$$Q_\varphi - N_1 \sin \varphi 2\pi r = 0;$$

где  $\varphi$  - текущая угловая координата (отсчитывается от оси вращения);

$$r = 2R \sin \varphi$$

Следовательно,

$$N_1 = \frac{Q_\varphi}{2\pi R \sin \varphi} = \frac{Q_\varphi}{2\pi R_2 (\sin \varphi)^2}$$

Кольцевое усилие  $N_2$  находят из уравнения

$$N_2 = R_2 \cos \varphi = \frac{Q_\varphi}{2\pi R} \operatorname{ctg} \varphi$$

Распор купола определяется как горизонтальная проекция меридионального усилия  $N_1$ ,

$$F_h = N_1 \cos \varphi = \frac{Q_\varphi}{2\pi r} \operatorname{ctg} \varphi$$

Распор в уровне опорного кольца ( $\varphi = \varphi_0$ ):

$$F_h = N_{1,0} \cos \varphi_0 = \frac{Q_{\varphi,0}}{2\pi r_0} \operatorname{ctg} \varphi_0$$

где  $N_{1,0}$  -- меридиональное усилие в уровне опорного кольца;  $\varphi_0$  -- половина центрального угла дуги оболочки в меридиональном направлении;  $r_0$  -- радиус опорного кольца;  $Q_{\varphi,0}$  - нагрузка, действующая на купол.

Распор  $F_h$  действует на опорное кольцо в радиальном направлении, поэтому растягивающее усилие в опорном кольце:

$$N_0 = F_{h,0} r_0 = N_{1,0} \cos \varphi_0 r_0 = \frac{Q_{\varphi,0}}{2\pi} \operatorname{ctg} \varphi_0$$

Сжимающее усилие в верхнем кольце от нагрузки  $q$  при соответствующей текущей координате  $\varphi$  определяется аналогично

Под действием вертикальной нагрузки купол сжат, а вблизи опорного кольца растянут. Существует нейтральное кольцевое сечение («параллель»), вдоль которой усилия  $N_2$  равны нулю. Координата этой параллели определяется формой купола и видом нагрузки.

Дальнейшее рассмотрение оболочки вращения под действием конкретных нагрузок проведем на примере сферического купола. Геометрически он наиболее прост, а основные выводы качественного порядка, сделанные для сферы, могут быть распространены на купола других форм.

Для сферы  $R_1 = R_2 = R$  формулы для расчета приобретают вид:

$$N_1 = \frac{Q_\varphi}{2\pi R (\sin \varphi)^2}$$

Формулы расчета сферических куполов на действие нагрузок от собственного веса  $g$  (кН/м<sup>2</sup> поверхности купола) и снега  $s$  (кН/м<sup>2</sup> перекрываемой куполом площади) приведены в СП.

Распределение меридиональных и кольцевых усилий в полусферическом куполе от вертикальных нагрузок.

Угол  $\varphi$ , при котором кольцевые усилия в куполе меняют знак, превращаясь из сжимающих в растягивающие, равен  $\sim 52^\circ$  при действии собственного веса и  $45^\circ$  -- при полной снеговой нагрузке. Для того, чтобы избежать растягивающих кольцевых усилий, стрела подъема купола  $f$  не должна превышать  $1/52$ . Более подъемистые купола нуждаются в специальных кольцевых затяжках в нижних приконтурных зонах. Ана-

логичные вычисления усилий и критических величин углов могут быть выполнены для куполов вращения других очертаний.

При действии горизонтальных сил (ветер, сейсмика) и несимметричных нагрузок (одностороннее расположение снега) напряженное состояние купола характеризуется, кроме нормальных усилий  $N_1$  и  $N_2$ , также касательными (сдвигающими) усилиями  $S$ . Расчет существенно усложняется и его выполняют по специальной методике.

Усилия  $N_1$  и  $N_2$  в гладкой оболочке купола, как правило, невелики, поэтому ее толщина определяется, главным образом, конструктивными или технологическими соображениями.

Цель занятия: получить навыки расчета и конструирования пространственных металлических конструкций зданий и сооружений.

#### **Занятие №4. «Расчет сетчатой оболочки в форме пологого гипара на прямоугольном плане с квадратной сеткой».**

Задание. Построить график зависимости нормальных перемещений в центре оболочки от уровня нагружения, определяемого шагом  $m$  м, для заданного условия опирания.

Методические рекомендации: используя основные геометрические характеристики оболочек и способы нагружения, необходимо выполнить расчет и построить график зависимости нормальных перемещений в центре оболочки от уровня нагружения.

*Основные геометрические характеристики оболочек:*

- размеры в плане  $l_1 = l_2$ ;
- шаг ребер 1-го и 2-го семейства  $a = 0,2$  м;
- площадь поперечного сечения ребер  $S = -3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ;
- угол наклона 1-вого семейства к оси составляют  $\alpha_1 = 0^\circ$ , угол наклона 2-го семейства к оси составляют  $\alpha_2 = 90^\circ$ ;
- кривизны оболочки  $k_1, k_2, k_{12} = -F/(ab) = -0,03 \text{ м}^{-1}$
- модуль упругости  $E = 2,1 \cdot 10^{11}$

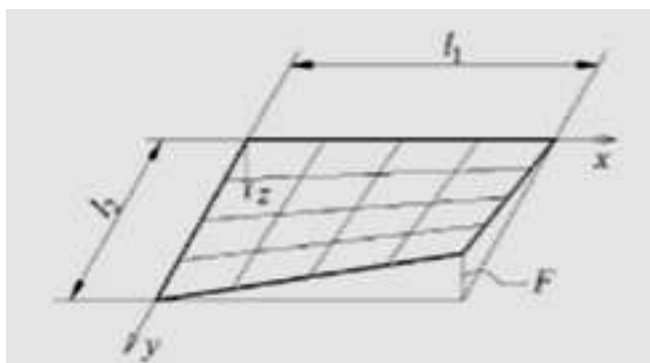


Схема оболочки пологого сетчатого гипара с квадратной сеткой

### *Граничные условия и способы нагружения*

1. Свободное опирание по контуру при  $x=0, l_1$  и  $y=0, l_2$ ; нормальное перемещение  $w=0$ . Шаг по нагрузке составляет  $\Delta q$  Па. Общее количество шагов  $m$ .
2. Шарнирно-неподвижное закрепление по контуру при  $x=0, l_1$  перемещения  $u=v=\theta y=w=0$ ; при  $y=0, l_2$  перемещения  $u=v=\theta x=w=0$ . Шаг по нагрузке составляет  $\Delta q$  Па. Общее количество шагов  $m$ .
3. Жесткое закрепление по контуру при  $x=0, l_1$  и  $y=0, l_2$  перемещения  $u=v=\theta x=\theta y=w=0$ . Шаг по нагрузке составляет  $\Delta q$ , Па. Общее количество шагов  $m$ .

Цель занятия: освоить навыки расчета и конструирования пространственных металлических конструкций зданий и сооружений.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины «Проектирование пространственных металлических конструкций» содержит три раздела. Во введении приведены описание видов текущего контроля, последовательности его проведения, критерии и нормы оценки, цель и планируемые результаты освоения дисциплины. Далее изложены методические указания к самостоятельной работе по изучению теоретического материала, а также подготовки к практическим занятиям. Далее приведен тематический план теоретических и практических занятий и список рекомендованных источников.



## Библиографический список

1. Металлические конструкции: в 3 т.: учеб. / Б. Ю. Уваров, В. В. Филиппов, Г. И. Белый; ред. В. В. Горев. - 3-е изд., стер. - Москва: Высшая школа, 2004 - . - Текст: непосредственный. Т. 1: Элементы конструкций. - 3-е изд., стер. - 552 с. - ISBN 5-06-003695-2.
2. Металлические конструкции: в 3 т.: учеб. пособие / В. В. Горев, Б. Ю. Уваров, В. В. Филиппов и др. - Москва: Высшая школа, 1997 - . - Текст: непосредственный. Т. 2 : Конструкции зданий. - 1999. - 528 с. - ISBN 5-06-003538-7.
3. Металлические конструкции: учеб. пособие: в 3 т. / В. В. Горев, Б. Ю. Уваров, В. В. Филиппов ; под ред. В. В. Горева. - Москва: Высшая школа, 1997 - . - Текст: непосредственный. Т. 3: Специальные конструкции и сооружения. - 1999. - 544 с.: ил. - ISBN 5-06-003698-7.
4. Металлические конструкции. Специальный курс: учеб. пособие для студентов инж.-строит. вузов и фак. / Под общ. ред. Н.С. Стрелецкого. - Москва: Стройиздат, 1965. - 366 с. - Текст: непосредственный.
5. Металлические конструкции: учеб. / Ю. И. Кудишин, Е. И. Беленя, В. С. Игнатьева [и др.]; под ред. Ю. И. Кудишина. - 12 изд., стер. - Москва: Академия, 2010. - 681 с. - ISBN 978-5-7695-6706-3. - Текст: непосредственный.
6. Казакова, И. С. Пространственные металлические конструкции покрытий зданий : учебное пособие / И. С. Казакова. — Вологда: ВоГУ, 2017. — 127 с. — Режим доступа: для авториз. пользователей. — Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/171247> (дата обращения: 17.02.2023). — ISBN 978-5-87851-763-8. — Текст : электронный.
7. Расчет и проектирование пространственных металлических конструкций: учебное пособие / Е. В. Горохов, В. Ф. Мущанов, Я. В. Назим, И. В. Роменский; под редакцией Е. В. Горохова. — Макеевка: Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ЭБС АСВ, 2012. — 561 с. — Режим доступа: для авторизир. пользователей. — Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/92346.html> (дата обращения: 17.02.2023). — ISBN 978-617-599-012-4. — Текст: электронный.

Локальный электронный методический материал

ЖАННА ГРИГОРЬЕВНА КОНЦЕДАЕВА

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ**

*Редактор И. Голубева*

Уч.-изд. л. 1,6. Печ. л. 1,6

Издательство федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Калининградский государственный технический университет».  
236022, Калининград, Советский проспект, 1