

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**КАФЕДРА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**



## **Арки из древесины и материалов на ее основе**

### **УЧЕБНО–МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ**

по дисциплине «Конструкции из дерева и пластмасс»  
для студентов специальности 1–70 02 01  
«Промышленное и гражданское строительство»  
дневной и заочной формы обучения

Брест 2022

УДК 624.011/.014(035)  
ББК 38.54я 2  
В64

*Рекомендовано учебно-методическим объединением в сфере высшего образования Республики Беларусь по образованию в области строительства и архитектуры в качестве учебно-методического пособия по дисциплине «Конструкции из дерева и пластмасс» для студентов специальности 1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство» высшего образования I ступени.  
Протокол № 2 от 4 октября 2021 г.*

**Рецензенты:**

*В. А. Лебедь*, зам. директора филиала РУП «Институт БелНИИС», к. т. н.;  
*В. В. Тур*, зав. кафедрой бетона и строительных материалов  
д.т.н., профессор

**В64**     **Арки из древесины и материалов на ее основе** / А. Я. Найчук, И. Ф. Захаркевич, А. Б. Шурин; под ред. А. Я. Найчука, И. Ф. Захаркевича, А. Б. Шурина. – Брест : Издательство БрГТУ, 2022. – 68 с.

**ISBN 978-985-493-548-5**

Настоящее пособие разработано сотрудниками кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета в соответствии с требованиями и правилами ТНПА, действующими на территории Республики Беларусь по состоянию на 01 сентября 2021 года.

Пособие предназначено для использования студентами при выполнении курсового и дипломного проекта по дисциплине «Конструкции из дерева и пластмасс», а также специалистами, занимающимися проектированием деревянных конструкций.

УДК 624.011/.014(035)  
ББК 38.5 я 2

ISBN 978-985-493-548-5

© Коллектив авторов, 2022  
© Издательство БрГТУ, 2022

## Оглавление

Введение .....	4
Термины и определения.....	5
Обозначения .....	7
<b>1 Типы деревянных арок и область их применения .....</b>	<b>11</b>
1.1 Общие сведения .....	11
1.2 Классификация арок.....	11
1.3 Область применения арок.....	13
<b>2 Общие рекомендации по конструированию и расчету деревянных арок .....</b>	<b>14</b>
2.1 Определение нагрузок.....	14
2.2 Определение прочностных и упругих характеристик древесины и древесных материалов.....	17
2.3 Рекомендации по конструированию и расчету арок.....	17
2.4 Рекомендации по конструированию и расчету узлов арок .....	35
<b>3 Пример конструирования и расчета трехшарнирной дощатоклееной арки пролетом 60 м.....</b>	<b>38</b>
3.1 Исходные данные.....	38
3.2 Предварительное определение геометрических характеристик арки .....	39
3.3 Определение характеристик древесины арки .....	40
3.4 Определение значений частных коэффициентов .....	40
3.5 Определение характеристических и расчетных значений нагрузок.....	40
3.5.1 Постоянные нагрузки.....	40
3.5.2 Снеговая нагрузка (переменная).....	41
3.6 Статический расчет арки .....	42
3.7 Проверки предельных состояний несущей способности арки.....	47
3.7.1 Проверка прочности древесины от действия растягивающих поперек волокон $\sigma_{t,90,d}$ напряжений .....	47
3.7.2 Проверка устойчивости плоской формы деформирования арки .....	49
3.7.3 Проверка устойчивости арки в плоскости ее изгиба .....	51
3.8 Конструирование и расчет опорных и коньковых узлов арки .....	53
3.8.1 Проверка сопротивления опорных площадок под плитами башмаков опорных узлов при сжатии древесины вдоль волокон и сопротивления сдвигу в опорных сечениях.....	53
3.8.2 Конструирование и расчет стальных элементов опорного узла .....	55
3.8.3 Проверка сопротивления опорных площадок под плитами башмаков коньковых узлов при сжатии древесины вдоль волокон и сопротивления сдвигу в опорных сечениях.....	58
3.8.4 Конструирование и расчет стальных элементов конькового узла .....	58
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А .....</b>	<b>60</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....</b>	<b>61</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В .....</b>	<b>64</b>
<b>Список использованных источников.....</b>	<b>67</b>

## Введение

Целью данного учебно-методического пособия (далее – пособие) является закрепление у студентов теоретических знаний, полученных в процессе изучения курса по дисциплине «Конструкции из дерева и пластмасс» и приобретения практических навыков проектирования деревянных арок строительных сооружений в соответствии с требованиями технических нормативно-правовых актов (ТНПА) Республики Беларусь.

Данное пособие является методическим документом, направленным на краткое и исчерпывающее изложение положений ТНПА, которыми необходимо руководствоваться при проектировании арок с использованием пиломатериалов, многослойной клееной древесины, клееной древесины из шпона (LVL) и фанеры.

В пособии приводятся рекомендации по конструированию и расчету опорных и коньковых узлов, стыков элементов большепролетных арок, получивших широкое распространение, прошедших экспериментальную проверку в строительстве. Данное пособие может быть использовано не только студентами при выполнении курсового или части дипломного проекта, но и проектными организациями при проектировании строительных сооружений, где в качестве несущих конструкций покрытий используются арки, изготовленные из древесины и материалов на ее основе.

В настоящем пособии приведены: классификация и область применения деревянных арок; выполнение подсчета и сочетания нагрузок; определение расчетных значений усилий, возникающих в элементах арок; методика определения расчетных значений прочностных и упругих характеристик материалов, используемых при изготовлении арок; рекомендации по выполнению проверок предельных состояний несущей способности и эксплуатационной пригодности как самих арок, так и их узлов; рекомендации по конструированию и расчету опорных, коньковых, а также стыковочных узлов элементов арок. Кроме того, приводится пример по конструированию и расчету деревянной арки.

Разработанное пособие по проектированию деревянных арок строительных сооружений базируется на положениях и правилах, изложенных в СП 5.05.01 «Деревянные конструкции», СН 2.01.01 «Основы проектирования строительных конструкций», СН 2.01.02 «Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Объемный вес, собственный вес, функциональные нагрузки для зданий», СН 2.01.04 «Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Снеговые нагрузки», СН 2.01.05 «Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Ветровые воздействия», а также личном опыте авторов данного пособия, приобретенном при проектировании и исследовании указанных конструкций. Следует отметить, что использование других ТНПА и пособий, изданных до 2018 г. при разработке конструкций арок, следует рассматривать в качестве информационного материала.

Пособие состоит из введения, терминов и определений, обозначений, двух разделов, приложения и списка используемых источников.

В первом разделе приведены общие сведения о деревянных арках, дана их классификация в зависимости от формы очертания, поперечного сечения, статической схемы, применяемых материалов, а также область их применения.

Во втором разделе изложены основные рекомендации по определению расчетных значений прочностных и упругих характеристик, применяемых материалов, расчетных значений нагрузок и их сочетаний, а также схем нагружения арок. Приведены рекомендации по конструированию и расчету арок, опорных, коньковых узлов, а также даны некоторые разъяснения ряда положений и правил ТНПА по проектированию арок.

В третьем разделе приведен пример по конструированию и расчету большепролетной дощатоклееной арки, в котором излагаются и разъясняются правила выполнения проверок предельных состояний несущей способности арки, опорного и конькового узлов.

В приложениях приведены значения коэффициентов свойств материалов и модификации, а также прочностных, упругих характеристик и удельного веса пиломатериалов, дощатоклееной древесины и фанеры.

## Термины и определения

В настоящем пособии применяются следующие термины и определения:

**арка** – криволинейный или многоугольный брус, закрепленный между двумя опорами и обращенный выпуклостью в направлении противоположном действию нагрузок;

**арка стрельчатая (высокая)** – арка, образованная двумя выпуклыми полуарками, пересекающимися под углом в вершине и очерченными из двух и более центров дугами, радиусами более половины длины пролёта;

**арка круговая** – арка, ось которой очерчена по дуге окружности;

**распор** – горизонтальная составляющая опорной реакции арки, рамы или висячей системы;

**конек** – верхнее горизонтальное ребро крыши, образующее водораздел;

**узел** – область сопряжения двух или более элементов конструкции;

**узел конструкции** – соединение разнородных элементов конструкции (каркаса), обладающее заданной несущей способностью и жесткостью;

**узел арки опорный** – узел арки, устанавливаемый на опору;

**узел арки коньковый** – узел в вершине (коньке) арки;

**соединение** – подвижное или неподвижное скрепление деталей или элементов для укрупнения или образования из них конструкций, узлов;

**ось арки** – линия, проходящая через центры тяжести поперечных сечений арки;

**строительные сооружения** – все, что построено или является результатом строительных работ;

**воздействие F**: а) совокупность сил (нагрузок), приложенных к конструкции (прямое воздействие); б) совокупность вынужденных деформаций или ускорений, вызванных, например, изменениями температуры и влажности, неравномерной осадкой опор или землетрясениями (косвенное воздействие);

**эффект воздействия E** – результат воздействия(-ий) на элементы конструкции (например, внутреннее усилие, момент, напряжение, деформация) или на конструкцию в целом (например, прогиб, поворот);

**постоянное воздействие G** – воздействие, вероятность в течение заданного базового периода времени и величина которого изменяются во времени незначительно по сравнению со средним значением или изменения которого всегда происходят в одном и том же направлении (монотонно) до достижения некоторого граничного значения;

**переменное воздействие Q** – воздействие, для которого отклонения во времени от среднего значения значительны и не являются монотонными;

**характеристическое значение воздействия F<sub>k</sub>** – основное репрезентативное значение воздействия;

**практически постоянное значение переменного воздействия  $\psi_2 Q_k$**  – значение, установленное таким образом, чтобы суммарный период времени, в течение которого оно будет превышено, составлял значительную часть базового периода. Значение может быть выражено как определенная часть характеристического значения с использованием коэффициента  $\psi_2 \leq 1$ ;

**сопутствующее значение переменного воздействия  $\psi Q_k$**  – значение переменного воздействия, которое рассматривается в одном сочетании с доминирующим воздействием;

**расчетное значение воздействия F<sub>d</sub>** – значение, полученное в результате умножения репрезентативного значения на частный коэффициент  $\gamma_f$ ;

**сочетание воздействий** – совокупность расчетных значений, используемых при проверке надежности конструкции, когда в рассматриваемом предельном состоянии различные воздействия действуют одновременно;

**характеристическое значение снеговой нагрузки** – снеговая нагрузка на грунт, определенная с годовой вероятностью превышения 0,02, за исключением чрезвычайных снеговых нагрузок ;

**характеристическое значение снеговой нагрузки на покрытие (кровлю)** – характеристическое значение снеговой нагрузки на грунт, умноженное на соответствующие коэффициенты;

**характеристическое значение плотности древесины** – 5 %-ный квантиль генеральной совокупности образцов с массой и объемом, соответствующими температуре 20 °С и относительной влажности воздуха 65 %;

**характеристическое значение прочности древесины** – 5 %-ный квантиль генеральной совокупности, полученный по результатам испытаний образцов продолжительностью 300 с с равновесным влагосодержанием при температуре 20 °С и относительной влажности воздуха 65 %;

**генеральная совокупность пород древесины** – пиломатериалы идентифицируемого происхождения из одной породы или комбинаций пород древесины, сортированные по прочности, и относящиеся к готовой продукции;

**характеристическое значение прочности при изгибе многослойной клееной древесины** – прочность, отнесенная к высоте поперечного сечения 600 мм;

**характеристическое значение прочности при растяжении многослойной клееной древесины** – прочность вдоль волокон, отнесенная к ширине поперечного сечения 600 мм;

**характеристическое значение прочности при сжатии многослойной клееной древесины** – прочность в направлении волокон.

**характеристическое значение прочности при сдвиге многослойной клееной древесины** – прочность равномерно нагружаемого испытываемого образца объемом 0,0005 м<sup>3</sup> [10];

**класс** – классификационная характеристика, применяемая при сортировке или определении прочности пиломатериалов;

**класс прочности** – результат классификации пиломатериалов на основе определенных значений механических характеристик и плотности;

**коэффициент формы снеговой нагрузки на покрытии** – отношение снеговой нагрузки на покрытии без заносов к снеговой нагрузке на грунте, определенное без учета влияния окружающей среды и температуры;

**температурный коэффициент** – коэффициент, определяющий уменьшение снеговой нагрузки на покрытии в зависимости от теплового потока через покрытие, вызывающего таяние снега;

**коэффициент окружающей среды** – коэффициент, определяющий уменьшение или увеличение нагрузки на покрытие неотапливаемого здания как части характеристической снеговой нагрузки на грунт;

**характеристика жесткости** – характеристика, используемая при расчете деформации конструкции (модуль упругости, модуль сдвига, модуль скольжения);

**влажность древесины** – процентное содержание свободной воды в полостях и гигроскопической воды в порах древесины;

**нагель** – цилиндрический стержень, из стали, пластмассы или древесины, плотно помещенный в предварительно просверленное отверстие или гнездо, и применяемый для передачи внутренних усилий, действующих перпендикулярно его оси.

**пиломатериалы** – пилопродукция установленных размеров и качества, имеющая как минимум две плоскопараллельные пласти;

**брус** – пиломатериал толщиной и шириной 100 мм и более;

**доска** – пиломатериал толщиной до 100 мм и шириной не менее двойной толщины;

**кромка пиломатериала** – любая из двух противоположных более узких продольных опиленных поверхностей обрезаемого пиломатериала, а также любая из обзолных продольных поверхностей необрезаемого пиломатериала;

**пласть пиломатериала** – любая из двух противоположных более широких продольных поверхностей пиломатериала, а также любая продольная поверхность пиломатериала с квадратным сечением;

**слой** – составная часть многослойного деревянного клееного элемента, состоящая из склеенных по длине и ширине заготовок;

**дощатоклееная древесина** – элемент конструкции, сформированный вследствие склеивания слоев из досок параллельно к направлению волокон;

**однородная дощато клееная древесина** – многослойная клееная древесина, поперечное сечение которой сформировано из слоев досок одного класса прочности и одной породы или сочетаний пород;

**комбинированная дощатоклееная древесина** – многослойная клееная древесина, поперечное сечение которой состоит из внутреннего и внешнего слоев из досок различных классов прочности и пород или сочетания пород.

## Обозначения

В настоящем пособии применяются следующие обозначения:

$A_d$	– расчетное значение площади поперечного сечения элемента; расчетное значение особого воздействия;
$E$	– эффект воздействия; модуль упругости;
$E_d$	– расчетное значение эффекта воздействий; расчетное значение модуля упругости;
$E_{mean}$	– среднее значение модуля упругости древесины или материала на ее основе;
$E_{0,05}$	– 5 %-ый квантиль модуля упругости древесины;
$E_{0mean}$	– среднее значение модуля упругости древесины вдоль волокон;
$F$	– воздействие;
$F_d$	– расчетное значение воздействия;
$F_k$	– характеристическое значение воздействия;
$F_w$	– ветровое воздействие (общее обозначение);
$F_{w,k}$	– характеристическое значение ветрового воздействия;
$G$	– постоянное воздействие;
$G_d$	– расчетное значение постоянного воздействия;
$G_k$	– характеристическое значение постоянного воздействия;
$G_{mean}$	– среднее значение модуля сдвига;
$G_{0,05}$	– 5 %-ый квантиль модуля сдвига;
$I_d$	– расчетное значение момента инерции поперечного сечения элемента;
$I_{y,d}$	– расчетные значения моментов инерции поперечного сечения элемента относительно оси Y;
$I_{z,d}$	– расчетные значения моментов инерции поперечного сечения элемента относительно оси Z ;
$M$	– изгибающий момент;
$M_{E,d}$	– расчетное значение изгибающего момента;
$M_{E,d,max}$	– максимальные расчетные значения изгибающего момента;
$M_{E,dI}$	– расчетное значение изгибающего момента при комбинации нагружения I;
$M_{E,dII}$	– расчетное значение изгибающего момента при комбинации нагружения II;
$M_{E,dIII}$	– расчетное значение изгибающего момента при комбинации нагружения III;
$M_{E,dIV}$	– расчетное значение изгибающего момента при комбинации нагружения IV;
$M_{max,E,dI}$	– максимальное расчётное значение изгибающего момента в сечении элемента от внешних нагрузок для комбинации нагружения I;
$M_{max,E,dII}$	– максимальное расчётное значение изгибающего момента в сечении элемента от внешних нагрузок при комбинации нагружения II;
$M_{max,E,dIII}$	– максимальное расчётное значение изгибающего момента в сечении элемента от внешних нагрузок при комбинации нагружения III;
$M_{max,E,dIV}$	– максимальное расчётное значение изгибающего момента в сечении элемента от внешних нагрузок при комбинации нагружения IV;
$M_{y,E,d}$	– расчетные значения изгибающего момента в сечении элемента, если изгиб происходит относительно оси y;
$M_{R,dI}$	– расчетное значение сопротивления изгибу в нормальном сечении элемента для комбинации нагружения I;
$M_{R,dII}$	– расчетное значение сопротивления изгибу в нормальном сечении элемента для комбинации нагружения II;
$M_{z,E,d}$	– расчетные значения изгибающего момента в сечении элемента, если изгиб происходит относительно оси z;

$M_{y,R,d}$	– расчетные значения сопротивлений в нормальном сечении элемента изгибу относительно оси Y;
$M_{z,R,d}$	– расчетные значения сопротивлений в нормальном сечении элемента изгибу относительно оси Z;
$Q$	– временное воздействие;
$Q_d$	– расчетное значение временного воздействия;
$Q_k$	– характеристическое значение отдельного временного воздействия;
$Q_{k,i}$	– характеристическое значение сопутствующего переменного воздействия $i$ ;
$Q_{k1}$	– характеристическое значение доминирующего переменного воздействия 1;
$R$	– сопротивление; несущая способность; опорная реакция;
$R_d$	– расчетное значение сопротивления; несущей способности, опорной реакции;
$S$	– статический момент сдвигаемой части поперечного сечения элемента относительно нейтральной оси; длина дуги арки;
$W_d$	– расчетное значение момента сопротивления поперечного сечения элемента;
$W_{y,d}$	– расчётное значение момента сопротивления сечения элемента относительно оси Y;
$W_{z,d}$	– расчётное значение момента сопротивления сечения элемента относительно оси Z;
$V$	– сдвигающее усилие, поперечная сила;
$V_{E,d}$	– расчетное значение сдвигающего усилия в сечении элемента;
$V_{E,d,max}$	– максимальное расчетное значение сдвигающего усилия, поперечной силы;
$a$	– расстояние;
$b$	– ширина поперечного сечения элемента;
$d$	– диаметр крепежного элемента (болта, винта, гвоздя и т. п.);
$f_k$	– характеристическое значение прочности материала;
$f_d$	– расчетное значение прочности материала;
$f_{m,d}$	– расчетное значение прочности древесины при изгибе;
$f_{m,k}$	– характеристическое значение прочности древесины при изгибе;
$f_{m,dI}$	– расчетное значение прочности древесины при изгибе для комбинации нагружения I;
$f_{m,dII}$	– расчетное значение прочности древесины при изгибе для комбинации нагружения II;
$f_{m,dIII}$	– расчетное значение прочности древесины при изгибе для комбинации нагружения III;
$f_{m,dIV}$	– расчетное значение прочности древесины при изгибе для комбинации нагружения IV;
$f_{m,d,y}$	– расчетное значение прочности древесины при изгибе относительно оси Y;
$f_{m,d,z}$	– расчетное значение прочности древесины при изгибе относительно оси Z;
$f_{c,0,d}$	– расчётное значение прочности древесины при сжатии вдоль волокон;
$f_{c,0,k}$	– характеристическое значение прочности древесины при сжатии вдоль волокон;
$f_{c,90,d}$	– расчётное значение прочности древесины при сжатии поперек волокон;
$f_{c,90,k}$	– характеристическое значение прочности древесины при сжатии поперек волокон;
$f_{t,0,d}$	– расчётное значение прочности древесины при растяжении вдоль волокон;



$f_{t,0,k}$	– характеристическое значение прочности древесины при растяжении вдоль волокон;
$f_{v,d}$	– расчётное значение прочности древесины при сдвиге (скалывании) вдоль волокон;
$f_{v,k}$	– характеристическое значение прочности древесины при сдвиге (скалывании) вдоль волокон;
$f_{m,g,d}$	– расчетное значение прочности клееной массивной древесины при изгибе;
$f_{m,g,k}$	– характеристическое значение прочности клееной массивной древесины при изгибе;
$f_{c,0,g,d}$	– расчетное значение прочности клееной массивной древесины при сжатии вдоль волокон;
$f_{c,0,g,k}$	– характеристическое значение прочности клееной массивной древесины при сжатии вдоль волокон;
$f_{c,90,g,d}$	– расчетное значение прочности клееной массивной древесины при сжатии поперек волокон;
$f_{c,90,g,k}$	– характеристическое значение прочности клееной массивной древесины при сжатии поперек волокон;
$f_{t,0,g,d}$	– расчетное значение прочности клееной массивной древесины при растяжении вдоль волокон;
$f_{t,0,g,k}$	– характеристическое значение прочности клееной массивной древесины при растяжении вдоль волокон;
$f_{t,90,g,d}$	– расчетное значение прочности клееной массивной древесины при растяжении поперек волокон;
$f_{t,90,g,k}$	– характеристическое значение прочности клееной массивной древесины при растяжении поперек волокон;
$f_{v,g,d}$	– расчётное значение прочности клееной массивной древесины при сдвиге (скалывании) вдоль волокон;
$f_{v,g,k}$	– характеристическое значение прочности клееной массивной древесины при сдвиге (скалывании) вдоль волокон;
$g_k$	– характеристическое значение постоянной нагрузки, приходящейся на единицу площади или длины конструкции;
$g_d$	– расчетное значение постоянной нагрузки, приходящейся на единицу площади или длины конструкции;
$g_{y,d}$	– расчётные значения постоянных нагрузок на единицу площади или длины элемента, определенных с учётом их комбинационных сочетаний, действующих в направлении оси Y;
$g_{z,d}$	– расчётные значения постоянных нагрузок на единицу площади или длины элемента, определенных с учётом их комбинационных сочетаний, действующих в направлении оси Z;
$q_k$	– характеристическое значение переменной нагрузки, приходящейся на единицу площади или длины конструкции;
$q_d$	– расчетное значение переменной нагрузки, приходящейся на единицу площади или длины конструкции;
$q_{y,d}$	– расчётные значения переменных нагрузок на единицу площади или длины элемента, определенных с учётом их комбинационных сочетаний, действующих в направлении оси Y;
$q_{z,d}$	– расчётные значения переменных нагрузок на единицу площади или длины элемента, определенных с учётом их комбинационных сочетаний, действующих в направлении оси Z;
$h$	– высота поперечного сечения элемента;
$l_d$	– расчетное значение пролета;
$k_{def}$	– коэффициент ползучести материала;

$k_m$	– коэффициент, учитывающий распределение нормальных напряжений по высоте поперечного сечения элемента при его изгибе;
$k_{mod}$	– коэффициент модификации;
$k_{mod,I}$	– коэффициент модификации для комбинации нагружения I;
$k_{mod,II}$	– коэффициент модификации для комбинации нагружения II;
$k_{mod,III}$	– коэффициент модификации для комбинации нагружения III;
$k_{mod,IV}$	– коэффициент модификации для комбинации нагружения IV;
$k_h$	– коэффициент, учитывающий изменение прочности древесины элемента конструкции в зависимости от высоты его поперечного сечения по отношению к стандартным размерам образцов;
$k_{h,y}$	– коэффициент, учитывающий изменение прочности древесины в зависимости от отношения стандартной высоты сечения к фактической по направлению оси Y;
$k_{h,z}$	– коэффициент, учитывающий изменение прочности древесины в зависимости от отношения стандартной высоты сечения к фактической по направлению оси Z;
$k_{FI}$	– коэффициент, значение которого зависит от класса последствий;
$u_{c,d}$	– предельное значение прогиба для проверяемого элемента или конструкции;
$u_{E,d}$	– расчетное значение прогиба для проверяемого элемента или конструкции;
$u_{inst}$	– начальное значение прогиба для проверяемого элемента или конструкции;
$u_{creep}$	– значение прогиба от ползучести древесины при длительном действии нагрузок;
$\alpha$	– угол приложения силы по отношению к волокнам древесины;
$\beta$	– частный коэффициент;
$\gamma_G$	– частный коэффициент для постоянных воздействий, учитывающий погрешности модели и отклонения размеров;
$\gamma_Q$	– частный коэффициент для переменных воздействий, учитывающий неопределенность расчетной модели и отклонения от заданных размеров;
$\gamma_{Q,i}$	– частный коэффициент для переменного $i$ -го воздействия;
$\gamma_M$	– частный коэффициент свойств материалов и изделий;
$\gamma_1$	– объемный вес древесины материала 1;
$\mu_1$	– коэффициент формы снеговых нагрузок;
$\psi_0$	– коэффициент, учитывающий комбинационное значение переменного воздействия;
$\psi_1$	– коэффициент, учитывающий частоту повторения переменного воздействия;
$\psi_2$	– коэффициент, учитывающий практически постоянное значение переменного воздействия;

# 1 Типы деревянных арок и область их применения

## 1.1 Общие сведения

**1.1.1** Арки – плоские распорные конструкции, в которых действие вертикальных нагрузок вызывает появление наклонных реакций в опорах. Горизонтальные составляющие опорных реакций в арках называют распором, который должен учитываться при проектировании фундаментов или опорных участков элементов зданий.

**1.1.2** Для восприятия распора в арках могут использовать затяжки. При наличии затяжки одна из опор арки выполняется шарнирно-неподвижной, а вторая – шарнирно-подвижной. В качестве опор для таких арок могут использоваться элементы каркаса здания (колонны, ригели) или стены относительно небольшой толщины, геометрические параметры которых определяются расчетом.

**1.1.3** Использование арок в качестве основных несущих конструкций покрытий зданий или пролетных строений мостов позволяет перекрывать большие пролеты без использования промежуточных опор.

**1.1.4** Арки используют при строительстве покрытий ангаров, стадионов, выставочных павильонов, аквапарков, манежей, зданий многофункционального назначения, складов и других строительных сооружений в качестве элементов несущих каркасов [1–6].

**1.1.5** По отношению к центральной вертикальной оси арки, как правило, проектируют симметричными. При соответствующем технико-экономическом обосновании допускается несимметричное выполнение арки [2, 5].

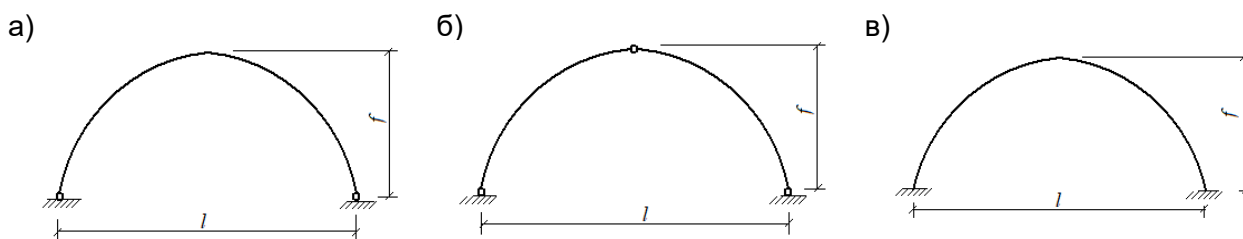
**1.1.6** Исходя из технологических возможностей изготовления, а также архитектурных требований, аркам могут придаваться различные очертания (в виде дуги окружности, эллипса и др.) [1, 3, 5]. При выборе формы арки необходимо стремиться, чтобы она максимально приближалась к кривой давления, т. е. имела такое очертание, при котором значения изгибающих моментов в поперечных сечениях были близки нулю.

## 1.2 Классификация арок

**1.2.1** По используемым материалам арки классифицируют:

- на арки из пиломатериалов (брусчатые на пластинчатых нагелях и кружальные арки из досок на гвоздях);
- арки из клееной древесины (дощатоклееные) [1, 4,5];
- арки из клееного шпона (LVL) [5];
- клееные дощато-фанерные арки;
- арки из перекрестно-клееной древесины (CLT).

**1.2.2** В зависимости от статической схемы деревянные арки бывают: двухшарнирные, трехшарнирные и бесшарнирные (рис. 1.1).



а) – двухшарнирные; б) – трехшарнирные; в) – бесшарнирные

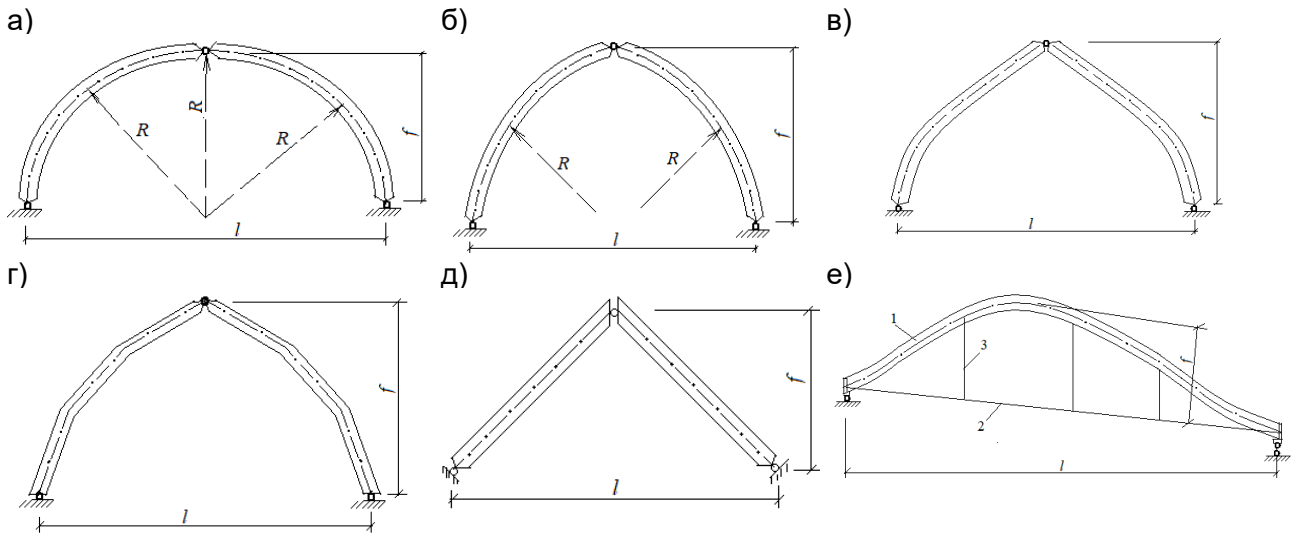
**Рисунок 1.1 – Статические схемы арок**

**1.2.3** В зависимости от очертания оси можно выделить следующие формы деревянных арок:

– арки кругового (пологого) очертания, состоящие из двух криволинейных элементов (полуарок), оси которых принадлежат одной окружности и соединенных в коньке (рис. 1.2а) [1, 5];

– арки стрельчатого очертания (высокие арки), состоящие из полуарок, оси которых располагаются на двух окружностях, смыкающихся в коньке под углом (рис.1.2б) [4, 5];

- арки параболического очертания [5] (рис. 1.2в);
- арки многоугольного очертания [1, 4, 5] (рис. 1.2г);
- арки треугольного очертания [5] (рис. 1.2д);
- арки волнообразного очертания [7] (рис. 1.2е).



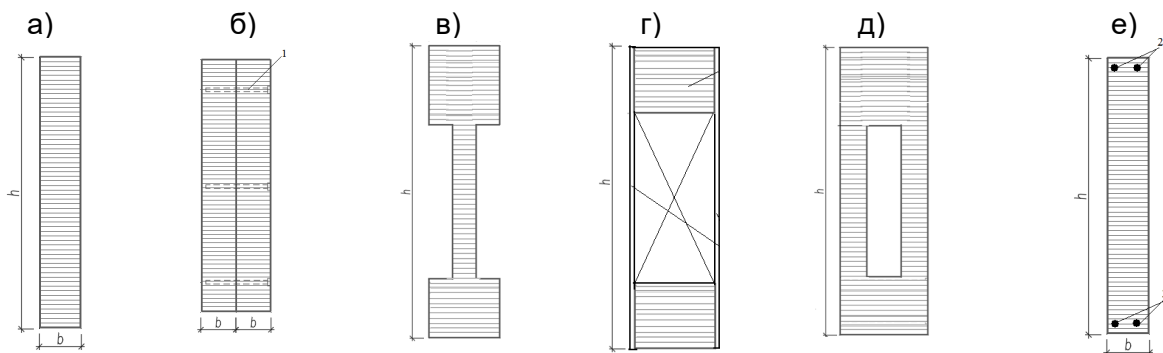
1 – арка; 2 – затяжка; 3 – подвески

- а) – кругового очертания (пологие); б) – стрельчатого очертания (высокие);  
 в) – параболического очертания; г) – ломаного очертания (многоугольные);  
 д) – треугольного очертания; е) – волнообразного очертания

**Рисунок 1.2 – Геометрические схемы арок**

**1.2.4** В зависимости от типа и формы поперечного сечения арки могут быть:

- сплошного сечения (прямоугольного или двутаврового, рис. 1.3а, в и е);
- спаренного сечения, состоящего из двух элементов, соединённых по ширине механическими связями (болтами, вклеенными стержнями, винтами, рис. 1.3б);
- коробчатого сечения из клееной древесины, клееной древесины и фанеры (рис. 1.3г и д);
- армированного сечения с использованием стальных или полимерных стержней (рис. 1.3е).



1 – вклеенные стержни или винты; 2 – арматурные стержни; 3 – элементы из фанеры

- а) – сплошное; б) – составное; в) – двутавровое из клееной древесины; г) – коробчатое из древесины и фанеры; д) – коробчатое из клееной древесины; е) – сплошное армированное

**Рисунок 1.3 – формы поперечных сечений арок**

**1.2.5** Восприятие распора арок может быть:

- непосредственно железобетонными фундаментами;
- несущими конструкциями каркаса здания;
- стальной затяжкой.

### 1.3 Область применения арок

**1.3.1** Деревянные арки применяют в качестве основных несущих конструкций зданий различного назначения (сельскохозяйственные, гражданские и общественные). Пролет арок может находиться от 12 м до 100 м и более [1, 4, 5].

**1.3.2** В строительных сооружениях, как правило, используют арки заводского изготовления из дощатоклееной древесины с небольшим количеством типоразмеров унифицированных элементов. Их формы, размеры и несущая способность должны отвечать требованиям покрытия сооружения самого различного назначения, в том числе уникальных по своим размерам и формам. Они должны быть технологичны, малой трудоемкости при изготовлении и транспортировке к объекту строительства.

**1.3.3** При проектировании деревянных арок должны выполняться требования по обеспечению их огнестойкости согласно [8], коррозионной стойкости древесины и материалов соединений по отношению к воздействию эксплуатационной среды согласно [9].

**1.3.4** Геометрические характеристики арок (пролет  $l$ , отношение стрелы подъема  $f$  к пролету  $l$ ) зависят от их формы и эффективности использования и могут находиться в следующих пределах:

– для арок кругового очертания с отношением стрелы подъема к пролету  $f/l = 1/4 \div 1/8$ , пролет  $l = 14 \div 60$  м;

– для арок стрельчатого очертания с отношением стрелы подъема к пролету  $f/l = 1/2 \div 1/3$  – пролет  $l = 24 \div 60$  м;

– для арок треугольного очертания без затяжек с отношением стрелы подъема к пролету  $f/l = 1/2 \div 1/3$  – пролет  $l = 12 \div 32$  м;

– для арок ломаного очертания с отношением стрелы подъема к пролету  $f/l = 1/4 \div 1/3$  – пролет  $l = 18 \div 49$  м;

– для арок треугольного очертания с затяжками с отношением стрелы подъема к пролету  $f/l = 1/4 \div 1/6$  – пролет  $l = 12 \div 24$  м;

– для арок волнообразного очертания с затяжками с отношением стрелы подъема к пролету  $f/l = 1/4 \div 1/5$  – пролет  $l = 18 \div 30$  м;

**1.3.5** При массовом строительстве складских и спортивных зданий применяют арки сплошного прямоугольного поперечного сечения пролетами 12, 18 и 24 м. Шаг таких арок – 3; 4,5 и 6 м.

**1.3.6** Пологие дощатоклееные арки с затяжками и отношением  $f/l \leq 1/6$  используют в покрытиях общественных многопролетных зданий пролетами от 12 ÷ 24. Опирание таких арок осуществляется на элементы несущего каркаса, воспринимающие вертикальные усилия.

**1.3.7** Стрельчатые дощатоклееные арки ( $f/l = 1/2 \div 1/3$ ) без затяжек (рис. 1.2б) чаще применяются в качестве основных несущих конструкций деревянных покрытий производственных зданий значительной высоты без стенового ограждения (придорожные склады антигололедных реагентов, прирельсовые и глубинные склады минеральных удобрений). Опирание таких арок осуществляется непосредственно на фундаменты, передавая им вертикальные и горизонтальные усилия. Наиболее рационально применение стрельчатых дощатоклееных арок без затяжек в покрытиях зданий, где в зоне конька кроме обычных распределенных нагрузок, действуют еще сосредоточенные нагрузки от подвесного технологического оборудования, например от веса тельфера с грузом или веса транспортерной галереи.

**1.3.8** Большепролетные пологие дощатоклееные трехшарнирные арки применяют в покрытиях зданий пролетами более 24 м. Опирание таких арок осуществляется на фундаменты. При пролетах менее 18 м арки выполняют двухшарнирными, что уменьшает трудоемкость их изготовления и упрощает монтаж в полносборном виде. Ширина сечений таких арок обычно не превышают 180 мм, что позволяет формировать сечение без стыков ламелей (досок) по кромкам.

**1.3.9** Затяжки в арках, как правило, изготавливают из арматурных стальных стержней (при небольших пролетах) или стальных профилей (при больших пролетах). Для предотвращения затяжек от провисания устанавливают подвески из профилированной стали (прутков, уголков), устанавливаемых на таком расстоянии, чтобы гибкость затяжек не превышала 400.

Для повышения жесткости арок с затяжками при их транспортировке последние могут изготавливаться из клееной древесины, клееного шпона, перекрестноклееной древесины.

**1.3.10** Пологие дощатоклееные арки с затяжками применяются в качестве основных несущих конструкций покрытий зданий с кирпичными стенами, железобетонным или стальным каркасом. При использовании таких арок, нижележащие конструкции зданий воспринимают только вертикальные усилия, а распор – затяжкой арки.

**1.3.11** Треугольные дощатоклееные арки могут быть только трехшарнирными как с затяжками, так и без них. Пролеты таких арок не превышают 40 м. Несмотря на их преимущества в изготовлении и устройстве кровли, основным недостатком является возникновение в их сечениях значительных по величине изгибающих моментов от распределенных нагрузок, по сравнению с моментами в сечениях арок кругового очертания.

Арки из брусьев и клееного шпона (LVL) проектируются трехшарнирными как с затяжками, так и без затяжек.

Перекрываемые пролеты с использованием арок из брусьев могут достигать 15 м, а из клееного шпона – 30 м.

**1.3.12** Треугольные дощатоклееные арки без затяжек (рис 1.2д) применяют в покрытиях складских зданий треугольного профиля без стен с подвесным оборудованием (монорельс тельфера, подвесная галерея) в коньковой зоне. Опирание таких арок осуществляется непосредственно на фундаменты. Изгибающие моменты в сечениях таких арок возникают, как правило, от распределенных нагрузок, а сосредоточенные в коньке нагрузки – продольные сжимающие усилия, которые оказывают незначительное влияние при определении размеров поперечных сечений полуарок.

**1.3.13** Клееные арки из древесины и фанеры проектируют треугольного или криволинейного очертания. Поперечное сечение таких арок принимают, как правило, коробчатое прямоугольное (рис. 1.3г), в котором пояса изготавливают из горизонтально расположенных склеенных по пласти досок, а в фанерными стенках волокна наружных рубашек ориентируют вдоль поясов. Участки в опорных и коньковых узлах таких арок на длине от их торцов  $l_1 = h \div 1,5h$  проектируют сплошного сечения из клееной древесины, где  $h$  – высота поперечного сечения арки.

**1.3.14** Клееные дощато-фанерные арки применяют реже, чем арки из дощатоклееной древесины или клееного шпона из-за трудоемкости их изготовления. Высота поперечного сечения таких арок  $h = l/30 \div l/50$ , отношение  $f/l = (1/2 \div 1/6)$ , а пролет  $l = 12 \text{ м} \div 30 \text{ м}$ .

**1.3.15** Брусчатые арки на пластинчатых нагелях проектируют трехшарнирными, треугольного очертания со стальными затяжками пролетом от 9 м до 15 м, опирающимися на конструкции стен. Высота сечения арок  $h = (1/50 \div 1/80)l$ , а отношение  $f/l = 1/4 \div 1/6$ . Такие арки в настоящее время не применяют из-за сложности изготовления.

**1.3.16** Арки из перекрестно-клееной древесины применяют в покрытиях общественных зданий пролетами от 9 м до 21 м и отношением  $f/l = 1/2 \div 1/4$ .

## **2 Общие рекомендации по конструированию и расчету деревянных арок**

### **2.1 Определение нагрузок**

**2.1.1** При проектировании арок значения постоянных и переменных нагрузок определяют в соответствии с требованиями [10–15].

### 2.1.2 Расчётные значения нагрузок определяют по формулам [10]:

– для постоянных нагрузок

$$g_d = \gamma_G \cdot g_k ; \quad (2.1)$$

– для переменных нагрузок

$$q_d = \gamma_Q \cdot q_k ; \quad (2.2)$$

здесь  $g_d$  и  $q_d$  – расчетное значение постоянной и переменной нагрузки, приходящейся на единицу площади или длины, кН/мм<sup>2</sup> или кН/мм;

$\gamma_G = 1,35$  и  $\gamma_Q = 1,50$  – частные коэффициенты для постоянных и переменных нагрузок, учитывающие возможность неблагоприятных отклонений от характеристических значений.

$g_k$  и  $q_k$  – характеристическое значение постоянной и переменной нагрузки, приходящейся на единицу площади или длины, кН/мм<sup>2</sup> или кН/мм.

**2.1.3** В соответствии с требованиями [10] и правилами [11] выполняют проверки предельных состояний несущей способности и эксплуатационной пригодности деревянных арок, используя метод частных коэффициентов.

Целью данных проверок является, чтобы во всех соответствующих расчетных ситуациях ни одно из значимых предельных состояний не было превышено, т. е.

– для предельных состояний несущей способности

$$E_{d,USL} \leq R_d , \quad (2.3)$$

– для предельных состояний эксплуатационной пригодности

$$u_{E,d} \leq u_{c,d} , \quad (2.4)$$

здесь  $E_{d,USL}$  – расчетное значение эффекта воздействий (момента, продольной или поперечной силы);

$R_d$  – расчетное значение сопротивления сечения, опорной площадки / несущей способности соединения, конструкции;

$u_{E,d}$  – расчетное значение прогиба для проверяемого элемента или конструкции;

$u_{c,d}$  – предельное значение прогиба для проверяемого элемента или конструкции, установленное в [10] или [11].

**2.1.4** При выполнении проверок предельных состояний арок и их узлов в соответствующих расчетных ситуациях отдельные нагрузки объединяют в сочетания по правилам, установленным в [10], определяя таким образом значения эффектов воздействий – внутренних усилий в элементах конструкции, используя следующие формулы:

– для проверок предельных состояний несущей способности

$$E_{d,USL} = \left\{ k_{FI} \cdot \left( \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q1} \Psi_{0,1} Q_{k1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \right) \right. , \quad (2.5)$$

$$\left. k_{FI} \cdot \left( \sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \right) \right\} \quad (2.6)$$

– для проверок предельных состояний эксплуатационной пригодности

$$E_{d,inst,SLS} = k_{FI} \cdot \left( \sum G_{k,j} + Q_{k1} + \sum \Psi_{0i} Q_{k,i} \right), \quad (2.7)$$

$$E_{d,creep,SLS} = k_{FI} \cdot \left( \sum G_{k,j} + \sum \Psi_{2i} Q_{k,i} \right), \quad (2.8)$$

здесь  $k_{FI}$  – коэффициент последствий, значение которого принимают в соответствии с требованиями [10];

$\gamma_{G,j}$  – частный коэффициент для постоянного  $j$ -го воздействия; определяют в соответствии с требованиями [10];

$\gamma_{Q,i}$  – частный коэффициент для переменного  $i$ -го воздействия; определяют в соответствии с требованиями [10];

$\psi_0$  – коэффициент преобразования переменных воздействий в комбинационное значение; принимают по таблице 5.3 в [10];

$\psi_{2i}$  – коэффициент, учитывающий практически постоянное значение переменного воздействия; принимают по таблице 5.3 в [10];

$\xi$  – коэффициент уменьшения неблагоприятных постоянных воздействий; определяют в соответствии с требованиями [10];

$G_{k,j}$  – характеристическое значение постоянного  $j$ -го воздействия; определяют в соответствии с требованиями [10, 12];

$Q_{k1}$  – характеристическое значение доминирующего переменного воздействия; определяют в соответствии с требованиями [13–15].

Примечания:

1 – При учете сочетаний, включающих постоянные и не менее двух переменных нагрузок, расчетные значения переменных нагрузок или соответствующих им усилий (эффектов воздействий) определяются из выражений (2.5–2.8), т. е. умножаются на коэффициенты сочетаний, установленные в [10 или 11].

2 – При учете основных сочетаний, включающих постоянные нагрузки и одну переменную нагрузку (длительную, среднесрочную или кратковременную), коэффициенты  $\xi$  и  $\psi$  в выражениях (2.5–2.8), принимают равными единице.

### 2.1.5 В соответствии с требованиями [10]:

– для класса последствий СС1, значение  $k_{FI} = 0,9$ ;

– для класса последствий СС2, значение  $k_{FI} = 1,0$ ;

– для класса последствий СС3, значение  $k_{FI} = 1,1$ .

**2.1.6** При проверке предельных состояний эксплуатационной пригодности арок полный прогиб определяют в соответствии (5.21) [11], т. е.

$$u_{E,d} = u_{fin} = u_{inst} + u_{creep}, \quad (2.9)$$

где  $u_{E,d}$  – расчетное значение прогиба;

$u_{inst}$  – начальный прогиб от кратковременного приложения нагрузок для их характеристического сочетания;

$u_{creep}$  – значение прогиба от ползучести древесины при длительном действии нагрузок для практически постоянного воздействия, определяемое по формуле (2.10) настоящего пособия.

**2.1.7** Значение прогиба от ползучести древесины или материалов на ее основе при длительном действии нагрузок определяют по формуле



$$u_{creep} = k_{def} \cdot u_{inst}, \quad (2.10)$$

где  $k_{def}$  – коэффициент ползучести, значение которого принимают по таблице 5.5 [5].

**2.1.8** Характеристические значения  $f_k$  прочности, а также среднее значение модуля  $E_{mean}$  упругости древесины или материалов на ее основе, принимают из таблиц Б.1, Б.2, Б.3 и Б.4 приложения Б настоящего пособия.

## **2.2 Определение прочностных и упругих характеристик древесины и древесных материалов**

**2.2.1** Расчетные значения прочности пиломатериалов, клееной древесины, материала из клееного шпона (LVL), древесины перекрестно клееной (CLT) и фанеры определяют для каждого вида напряженно-деформированного состояния по формуле (2.11).

$$f_d = k_{mod} \cdot \frac{f_k}{\gamma_M} \cdot \prod_1^n k_j, \quad (2.11)$$

где  $k_{mod}$  – коэффициент модификации (приведения), учитывающий изменение прочности древесины или материала на ее основе в зависимости от продолжительности действия нагрузки и условий эксплуатации; принимают по таблице А.2 приложения А настоящего пособия;

$f_k$  – характеристическое значение прочности древесины или материала на ее основе для рассматриваемого вида напряженного состояния; принимают из таблиц Б.1 – Б.4 приложения Б;

$\gamma_M$  – частный коэффициент свойств материала или изделия; принимают по таблице А.1 приложения А настоящего пособия;

$\prod_1^n k_j$  – произведение частных коэффициентов  $k_j$ , учитывающих геометрические параметры элемента конструкции, вид напряженного состояния и распределение напряжений в сечении элемента.

**2.2.2** Для материала элементов арок расчетные значения прочности должны определяться с учетом правил, установленных в п. 6.3 [11]. Согласно правилам данного пункта для определенных видов напряженного состояния, расчетные значения прочности материалов элементов арок рассчитываются с учетом коэффициентов  $k_h$  и  $k_l$ , определяемых по формулам (5.33) – (5.36) [11].

## **2.3 Рекомендации по конструированию и расчету арок**

**2.3.1** Для пологих арок стрела подъема  $f$  принимается равной не менее  $l/6$ , а при соответствующем технико-экономическом обосновании может быть уменьшена до  $l/7 \div l/8$ .

Для стрельчатых (высоких) арок стрелу подъема  $f$  рекомендуется принимать в пределах  $l/3 \div 2l/3$ , где  $l$  – пролет арки.

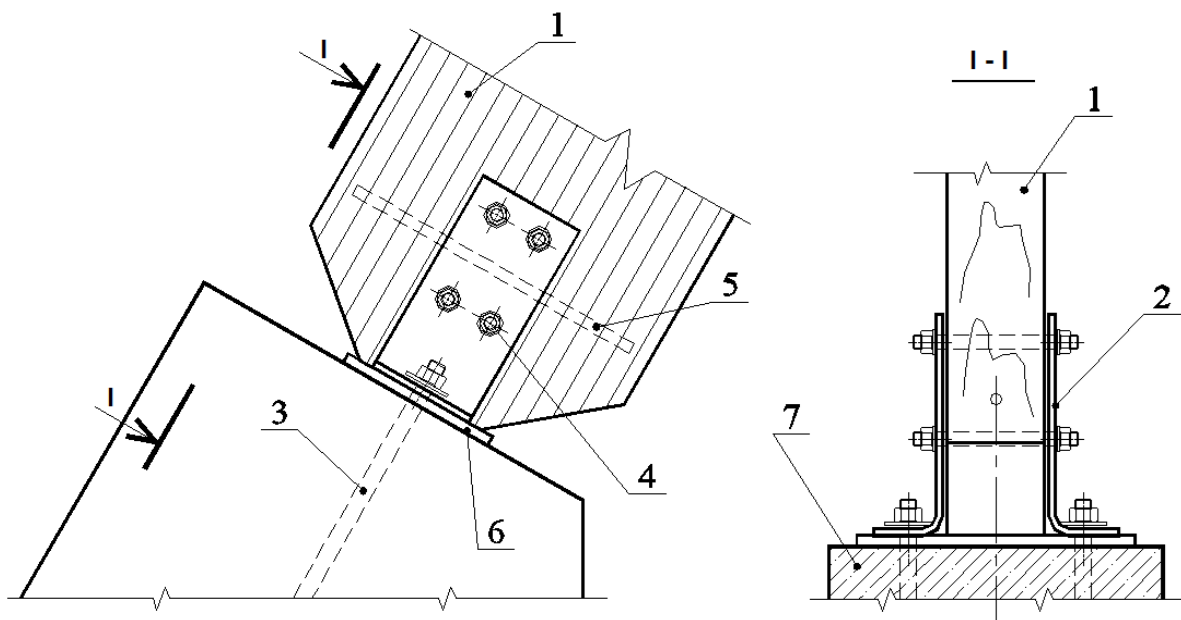
Высоту  $h$  поперечного сечения дощатоклееных арок всех типов рекомендуется назначать от  $l/30 \div l/50$ . Толщину слоев (досок) при радиусе кривизны до 15 м принимают не более 40 мм, а при большем радиусе – не более 50 мм.

Рекомендуемое отношение стрелы выгиба  $f_0$  дощатоклееных полуарок к радиусу  $R$  кривизны должно составлять  $f_0/R \leq 1/200$ .

**2.3.2** В зависимости от перекрываемых пролетов опирание арок на фундаменты или несущие конструкции здания может осуществляться:

– непосредственным упором части или всей торцовой поверхности арки, центрированной по ее оси с фиксацией опорных участков в проектном положении специальными элементами (пластинами, уголками, швеллерами), заделанных в опорные конструкции (рис. 2.1);

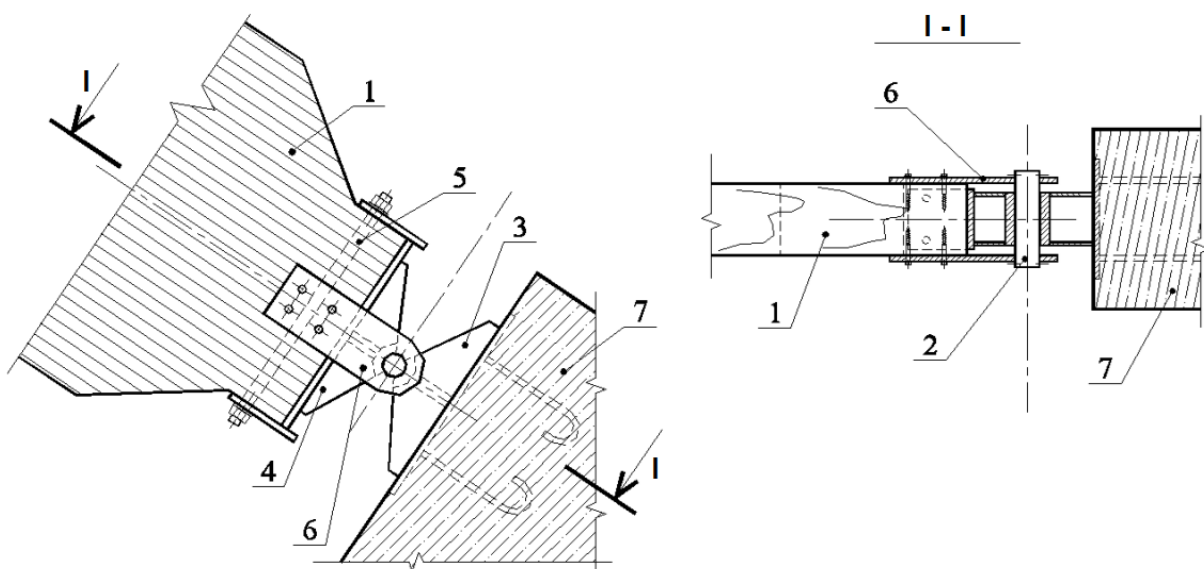
- через стальной шарнир (рис. 2.2 и 2.3). Такое соединение арки с опорной конструкцией является шарнирным;
- непосредственным упором всей торцевой поверхности арки на фундамент с фиксацией опорных участков в проектном положении посредством электросварки закладных металлических деталей арки (пластин соединенных с вклеенными или ввинченными под углом к волокнам древесины стержнями) с закладными металлическими деталями фундамента (рис. 2.4). При таком конструктивном решении соединение арки с опорной конструкцией является жестким.



- 1 – дощатоклееная арка; 2 – металлические уголки; 3 – анкерные болты;  
4 – стяжные шпильки; 5 – вклеенный стержень;

6 – опорная плита из бакелизированной фанеры; 7 – железобетонная опора

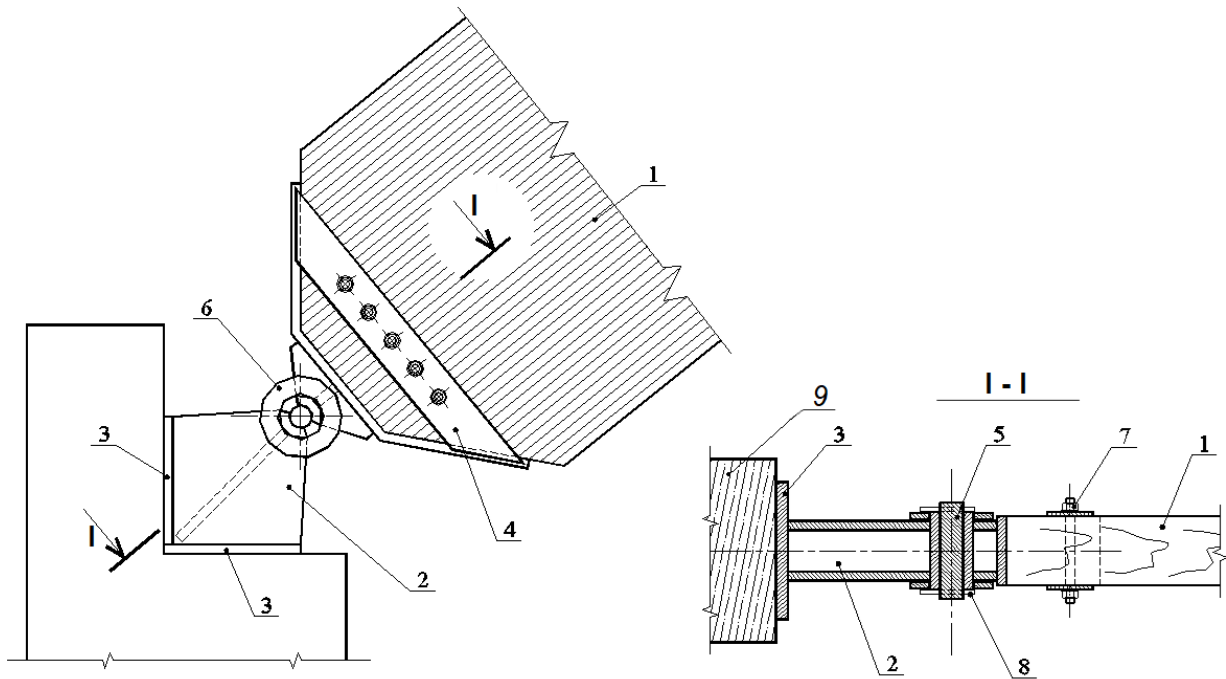
**Рисунок 2.1 – Схема шарнирного узла опирания арки на железобетонную опору**



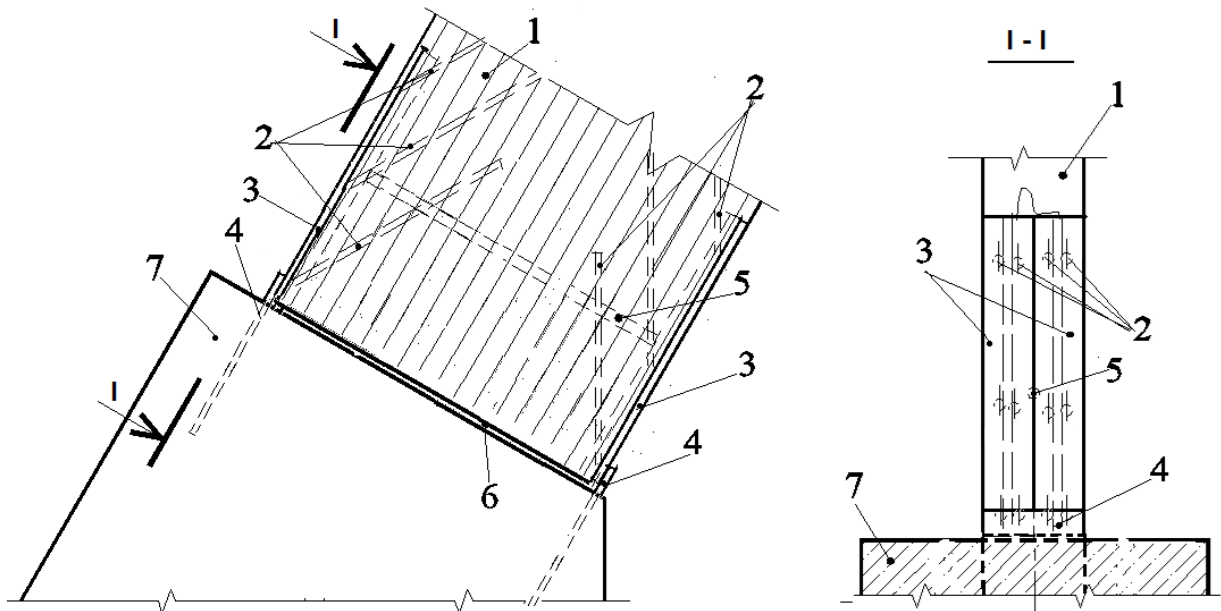
- 1 – дощатоклееная арка; 2 – стальной шарнир;  
3 – опорный башмак; 4 – металлический оголовок;

5 – стяжные шпильки; 6 – металлическая накладка на глухарях; 7 – фундамент

**Рисунок 2.2 – Схема шарнирного узла опирания арки на железобетонную опору с использованием стальных башмаков стаканного типа**



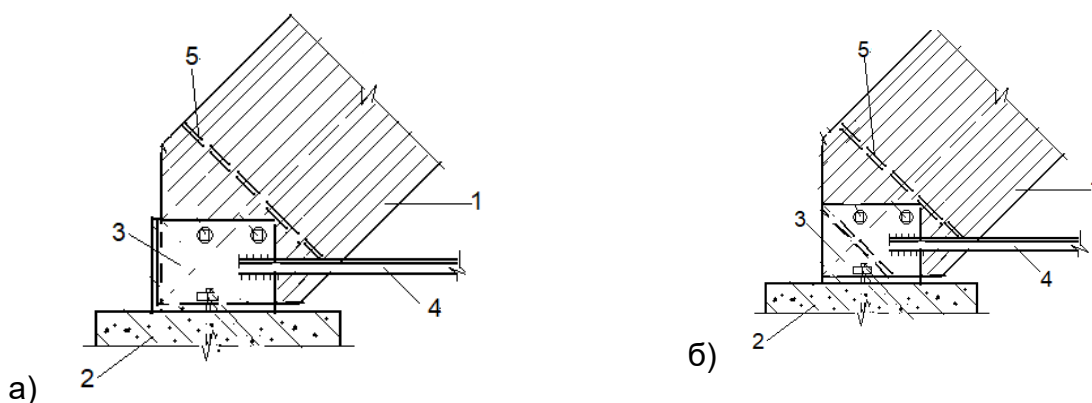
1 – дощатоклееная арка; 2 – металлический опорный столик;  
 3 – закладные пластины; 4 – металлический башмак; 5 – стальной шарнир;  
 6 – фиксирующие шайбы; 7 – стяжные шпильки; 8 – шплинты; 9 – фундамент  
**Рисунок 2.3 – Схема шарнирного узла опирания арки на железобетонную опору с использованием стальных башмаков**



1 – дощатоклееная арка; 3 – стальные детали таврового сечения с клееными под углом к волокнам древесины арматурными стержнями 2; 4 – стальная закладная деталь фундамента; 5 – стальные арматурные стержни, клеенные перпендикулярно волокнам древесины; 6 – жесткая гидроизоляционная прокладка; 7 – фундамент

**Рисунок 2.4 – Схема жесткого узла соединения арки с железобетонной опорой с использованием клеенных стальных стержней**

**2.3.3** Опорные узлы арок со стальными затяжками могут выполняться в нескольких конструктивных вариантах. При пролетах арок с затяжками менее 24 м соединение арки с затяжкой выполняется в виде общего стального башмака, а в арках пролетами более 24 м используют два отдельных башмака (рис. 2.5 и рис. 2.6).

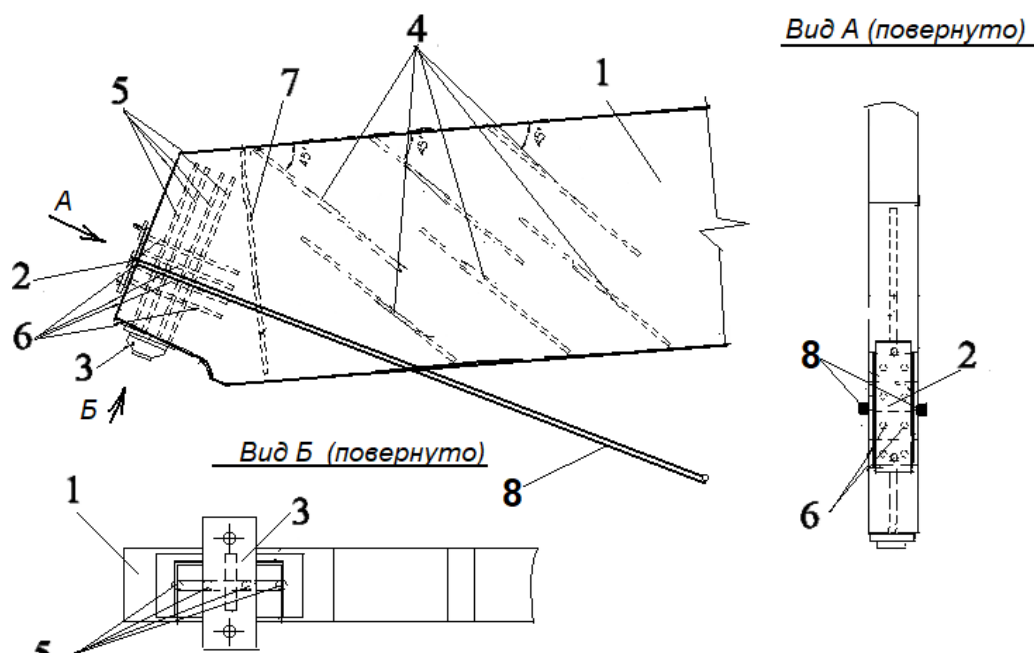


- 1 – дощатоклеенная арка; 2 – опора (колонна, стена и т. п.);  
 3 – башмак; 4 – затяжка; 5 – вклеенные или ввинченные стержни  
 а) – узел с *раздельным восприятием распора и опорной реакции*;  
 б) – узел с *лобовой передачей усилия сжатия*

**Рисунок 2.5 – Схема опорного узла арки с затяжкой общим стальным башмаком**

В узлах с общим башмаком восприятие распора и опорной реакции в соединении арки с затяжкой может передаваться раздельно или совместно посредством лобового упора – непосредственным упором части поперечного сечения арки. При таком решении под упорной плитой башмака происходит смятие древесины вдоль волокон. В узлах с раздельным восприятием распора и опорной реакции под плитами башмака возникает сжатие древесины под углом к волокнам от действия вертикального усилия (реакции) и распора. При недостаточной площади опорных площадок под плитами башмаков, для увеличения сопротивлений древесины сжатию под углом к волокнам от действия сжимающих усилий используют вклеенные стальные стержни (рис. 2.6).

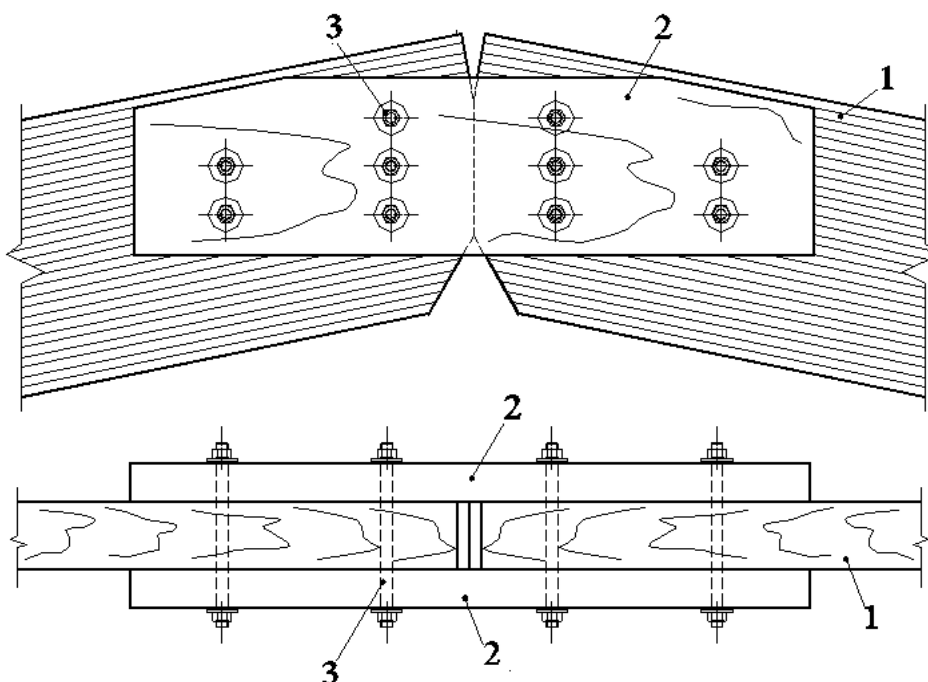
В арках с затяжками пролетом более 30 м одна из опор устраивается подвижной



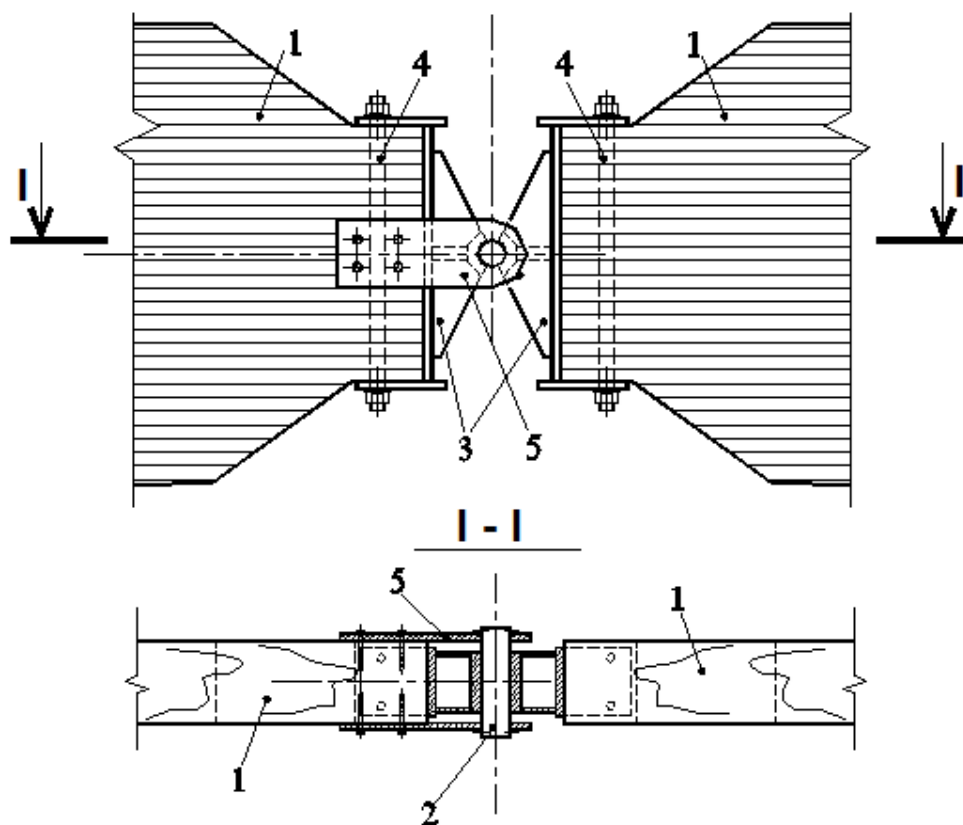
- 1 – дощатоклеенная арка; 2 – башмак для крепления затяжки с арматурными вклеенными стальными стержнями (6); 3 – опорный башмак с пластиной и вклеенными стальными стержнями (5); 4 – наклонно вклеенные по отношению к волокнам древесины стальные арматурные стержни; 7 – перпендикулярно вклеенные по отношению к волокнам древесины стальные арматурные стержни; 8 – стальная затяжка

**Рисунок 2.6 – Схема опорного узла арки с затяжкой, выполненного с использованием отдельных башмаков**

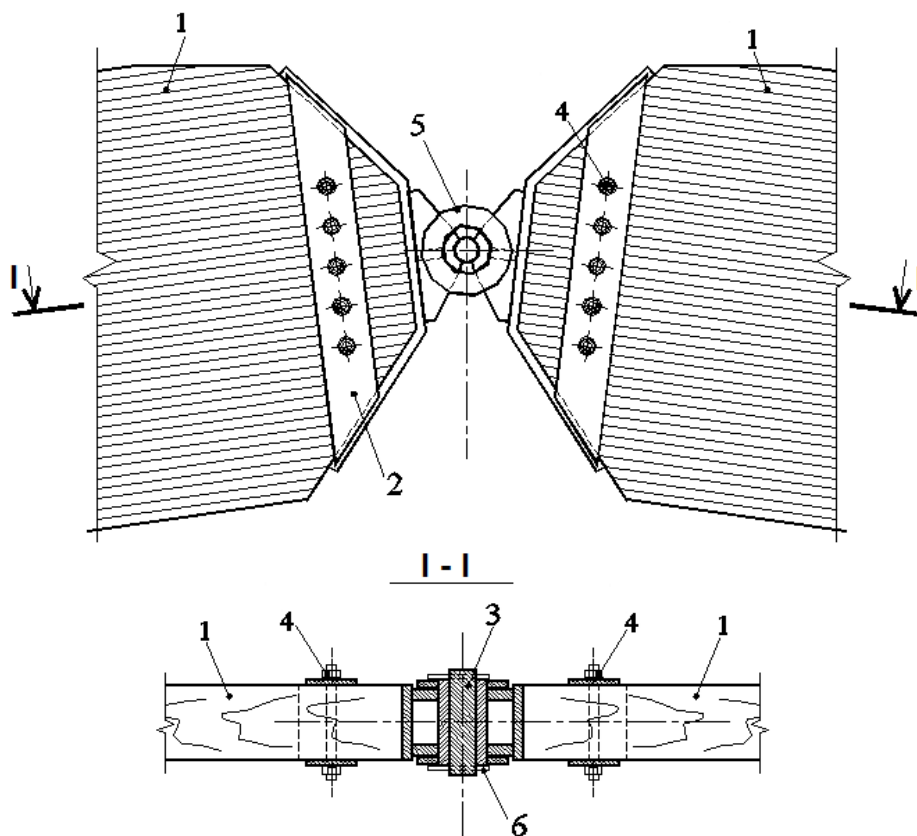
Некоторые примеры конструктивных решений коньковых узлов арок приведены на рисунках 2.7–2.9.



1 – дощатоклееные полуарки; 2 – деревянная накладка; 3 – стяжные нагели в виде шпилек  
**Рисунок 2.7 – Схема конькового узла арки с непосредственным упором части поперечного сечения**



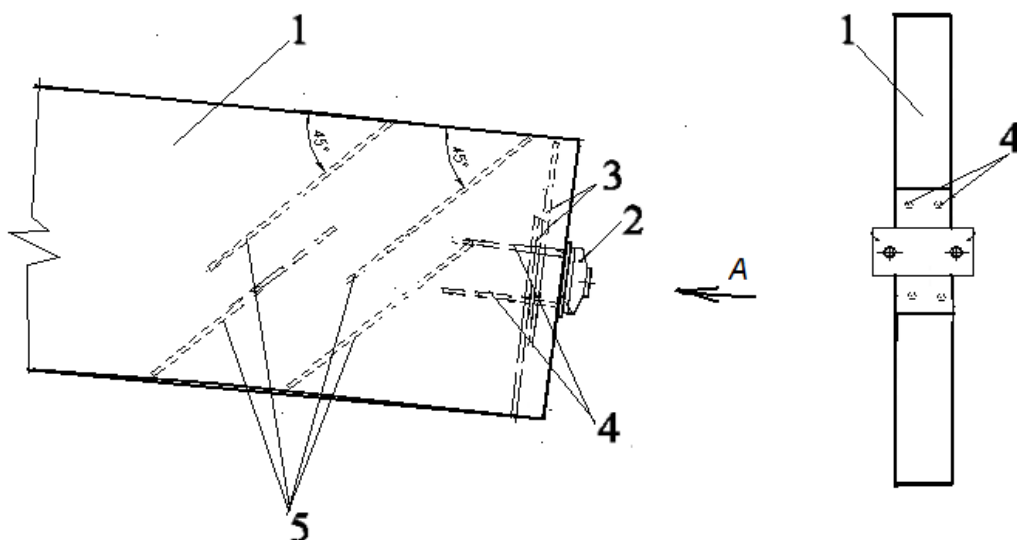
1 – дощатоклееные полуарки; 2 – стальной шарнир; 3 – металлический оголовок; 4 – стяжные шпильки; 5 – металлическая накладка на глухарях  
**Рисунок 2.8 – Схема конькового узла арки, выполненного с использованием стальных башмаков**



1 – дощатоклеенные деревянные полуарки; 2 – металлический башмак;  
3 – стальной шарнир; 4 – стяжные шпильки; 5 – фиксирующие шайбы; 6 – шпильки

**Рисунок 2.9 – Схема конькового узла арки, выполненного с использованием стальных башмаков стаканного типа**

Вид А (повернуто)



1 – дощатоклеенная полуарка; 2 – стальной башмак с вклеенными вдоль волокон древесины арматурными стержнями (4); 3 – перпендикулярно вклеенные по отношению к волокнам древесины арматурные стержни; 5 – наклонно вклеенные по отношению к волокнам древесины стальные арматурные стержни

**Рисунок 2.10 – Схема конькового узла арки с использованием металлических башмаков и вклеенных стальных арматурных стержней**

При шарнирном сопряжении полуарок должны быть установлены боковые наклад-  
ки – деревянные на болтах или стальные на болтах (глухарях), обеспечивающие

восприятие растягивающих усилий, возникающих в процессе монтажа или эксплуатации между полуарками в коньке, аркой и фундаментом в опорном узле.

**2.3.4** Рекомендуемые типы арок могут применяться в зданиях различного назначения с утепленными или неутепленными ограждающими конструкциями (плитами или настилами), изготовленных из различных плитных материалов.

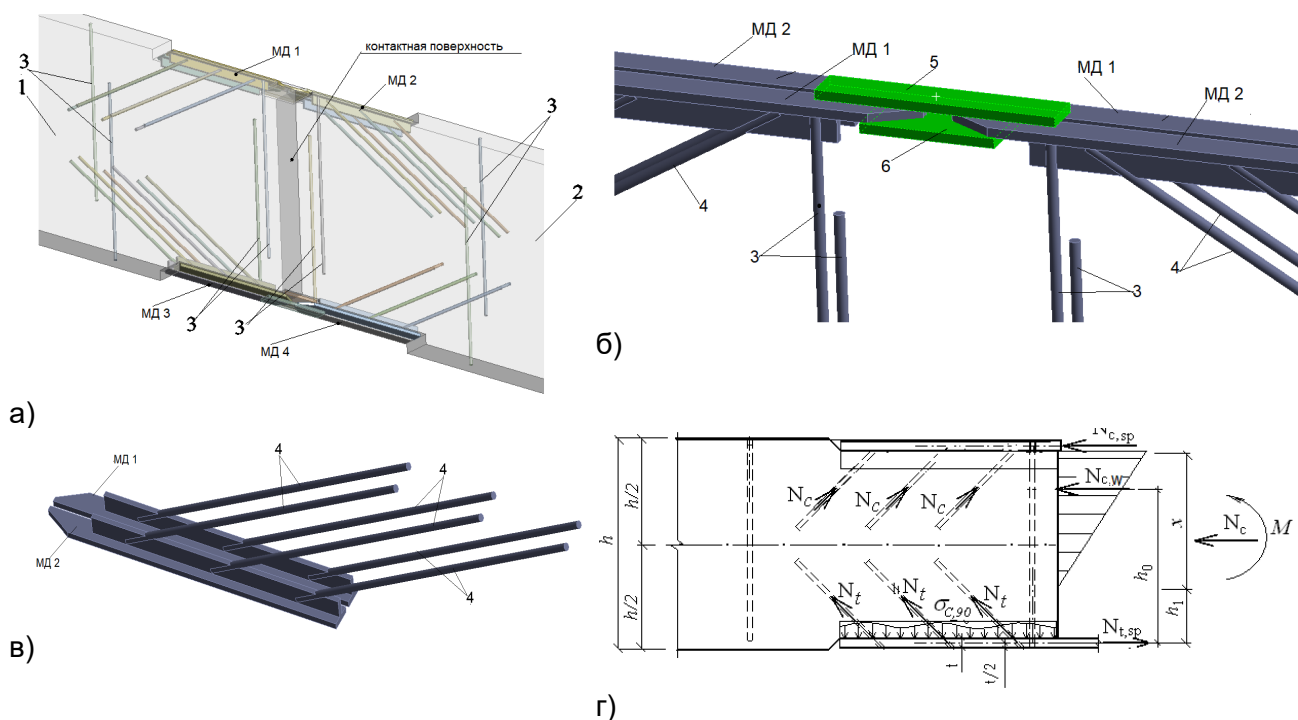
**2.3.5** При проектировании покрытий зданий предпочтение следует отдавать двухшарнирным аркам. Пролеты таких арок принимают, исходя из условий заводского изготовления и транспортирования на объект строительства. При наличии таких ограничений устраивают жесткие стыки между элементами арки.

**2.3.6** Трехшарнирные арки рекомендуется использовать при пролетах до 60–80 м, а также в тех случаях, когда условия заводской технологии или транспортирования не позволяют применить двухшарнирные арки.

**2.3.7** При пролетах более 70 м чаще всего используют двухшарнирные арки, состоящие из трех отпавных элементов одинаковой длины с жесткими стыками. Узлы стыков должны располагаться в зонах минимальных изгибающих моментов.

Пример конструктивного решения жесткого стыковочного узла дощатоклееной арки с использованием вклеенных стержней приведен на рисунке 2.11.

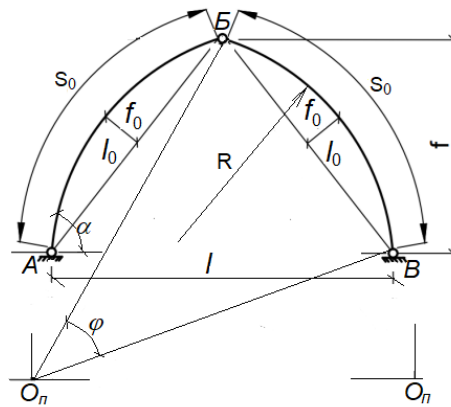
**2.3.8** Арки не рекомендуется использовать, если конструкция подвержена действию больших сосредоточенных нагрузок.



МД 1, МД 2, МД 3 и МД 4 – металлические закладные детали в деревянных элементах арки с наклонно вклеенными к волокнам древесины стальными арматурными стержнями (4);  
 1 и 2 – деревянные элементы арки; 3 – стальные арматурные стержни, вклеенные перпендикулярно волокнам древесины; 5 – верхняя соединительная стальная пластина;  
 6 – нижняя соединительная стальная пластина  
 а) – общая схема узла стыка элементов арки; б) – схема соединения закладных деталей МД 1 и МД 2; в) – схема деталей МД 1 и МД 2 с арматурными стержнями;  
 г) – расчетная схема узла стыка

**Рисунок 2.11 – Схема жесткого стыковочного узла дощатоклееной арки, выполненного с использованием вклеенных стержней**

**2.3.9** Геометрическую ось высоких (стрельчатых) трехшарнирных арок (рис. 2.12) определяют из условий обеспечения заданного внутреннего габарита помещения; при этом стрелу выгиба  $f_0$  полуарок принимают не менее  $1/15$  длины хорды  $l_0$  полуарки (расстояние между опорным и коньковым шарнирами).



**Рисунок 2.12 – Геометрическая схема стрельчатой арки**

Длину хорды  $l_0$  стрельчатой арки при пролете  $l$  и стреле подъема арки  $f$  (рис. 2.12) определяют из выражения

$$l_0 = \sqrt{f^2 + 0,5 \cdot l^2} , \quad (2.12)$$

где  $l_0$  – длина хорды арки;  
 $f$  – стрела подъема арки;  
 $l$  – пролет арки.

Стрелу выгиба  $f_0$  полуарки определяют из выражения

$$f_0 = \frac{l_0}{15} , \quad (2.13)$$

Длину дуги полуарки  $S_0$  определяют

$$S_0 = \sqrt{l_0^2 + \frac{16 \cdot f_0^2}{3}} . \quad (2.14)$$

При определении радиуса  $R$  кривизны полуарки используют выражение

$$R = \frac{l_0^2}{8 \cdot f_0} - \frac{f_0}{2} . \quad (2.15)$$

При устройстве прогонов по аркам, их шаг  $b_b$  определяют из выражения

$$b_b = R_b \cdot \sin \frac{\varphi}{n_b} , \quad (2.16)$$

где  $n_b$  – количество шагов прогонов с одной стороны ската;

$\varphi$  – центральный угол дуги полуарки;

$R_b$  – радиус окружности, очерченной по верхним граням настила кровли, определяемый по формуле (2.17).

$$R_b = R + \frac{h}{2} + h_b + \delta_l , \quad (2.17)$$

здесь  $R$  – радиус дуги арки (рис. 2.12);

$h$  – высота поперечного сечения арки, принимаемая равной  $(1/35 \div 1/40)$  от длины пролета  $l$  арки;

$h_b$  – высота поперечного сечения прогона, принимаемая равной  $(1/15 \div 1/20)$  от длины шага  $b$  арок;

$\delta_l$  – толщина досок настила или высота сечения профнастила, принимаемая в интервале от 30 мм до 40 мм.



**2.3.10** Геометрические параметры оси (рис. 2.13) пологих (кругового или параболического очертания) арок определяют из выражений:

– радиус кривизны арки;

$$R = \frac{l^2 + 4f^2}{8f}, \quad (2.18)$$

– центральный угол  $\alpha$  дуги полуарки кругового очертания;

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{l}{2 \cdot R}\right), \quad (2.19)$$

– центральный угол  $\alpha$  дуги полуарки параболического очертания;

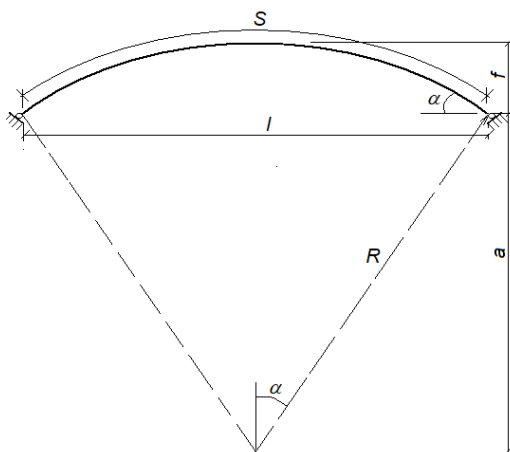
$$\alpha = \frac{180}{\pi} \cdot \arctg\left(\frac{2 \cdot f}{l}\right), \quad (2.20)$$

– длину дуги  $S$  арки кругового или параболического очертания;

$$S = \frac{\pi \cdot R \cdot 2\alpha}{180}, \quad (2.21)$$

где  $l$  – пролет арки;

$f$  – стрела подъема арки.



**Рисунок 2.13 – Геометрические параметры пологой арки**

**2.3.11** При предварительном определении размеров пологих арок сплошного сечения руководствуются следующими правилами:

– для арок пролетами  $l = 30 \div 100$  м, высота поперечного сечения  $h = l/50 \div l/30$ , а стрела подъема  $f \geq l/10$ ;

– для арок с переменной высотой поперечного сечения и пролетами  $l = 30 \div 100$  м, высота поперечного сечения  $h_{\max} = l/40 \div l/30$ , а стрела подъема  $f \geq l/10$ , где  $h_{\max}$  – максимальная высота поперечного сечения.

Для решетчатых (полуарки из ферм) арок пролетами  $l = 30 \div 120$  м, высота ферм  $h = l/40 \div l/20$ , а стрела подъема  $f \geq l/8$ .

**2.3.12** Определение внутренних усилий в элементах арок выполняют по правилам строительной механики или с использованием программных вычислительных комплексов.

При проведении статических расчетов арок для предельных состояний несущей способности руководствуются правилами, установленными в п 5.3.11 [11].

**2.3.13** Расчет арок сводится к проверкам предельных состояний несущей способности и предельных состояний эксплуатационной пригодности.

Проверки предельных состояний несущей способности арок выполняют для постоянных и переходных расчетных ситуаций при следующих комбинациях нагружения:

а) для пологих арок

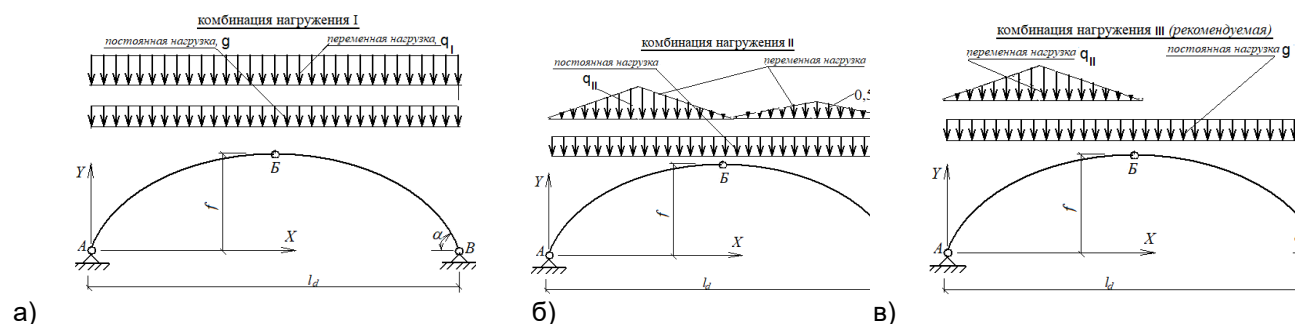
– расчетная равномерно распределенная постоянная  $g$  нагрузка на всем пролете арки и переменная (снеговая)  $q$  нагрузка на всем пролете арки или на части его в зависимости от угла  $\alpha$ , а также переменные нагрузки от подвесного оборудования (комбинация нагружения I, рис. 2.14а);

– расчетная равномерно распределенная постоянная  $g$  нагрузка на всем пролете арки и расчетная переменная (снеговая)  $q$  нагрузка, распределенная по треугольникам с разными значениями на каждой половине пролета или части его в зависимости от величины угла  $\alpha$ , а также переменные нагрузки от подвесного оборудования (комбинация нагружения II, рисунок 2.14б);

– расчетная равномерно распределенная постоянная  $g$  нагрузка на всем пролете арки и расчетная переменная (снеговая)  $q$  нагрузка, распределенная по треугольнику на половине пролета или части его в зависимости от величины угла  $\alpha$  (рекомендуемое нагружение), а также переменные нагрузки от подвесного оборудования (комбинация нагружения III, рисунок 2.14в);

– нагрузка от давления ветра в комбинации с постоянными и переменными нагрузками.

Примечание – В покрытиях с фонарями или при наличии соседних пролетов строительного сооружения распределение снеговой нагрузки принимается с учетом требований [13].



- а) – комбинация нагрузок I (постоянная  $g$  + переменная  $q$  снеговая нагрузки);  
 б) – комбинация нагрузок II (постоянная  $g$  нагрузка + переменная  $q$  снеговая нагрузка, распределенная по треугольникам); в) – рекомендуемая комбинация нагрузок III (постоянная  $g$  нагрузка + переменная  $q$  снеговая нагрузка, распределенная по треугольнику на половине пролета)

**Рисунок 2.14 – Схемы нагружения пологих арок**

б) для высоких (стрельчатых) арок:

– расчетная равномерно распределенная постоянная  $g$  нагрузка на всем пролете арки и переменная (снеговая)  $q$  нагрузка на всем пролете арки или части его, а также переменные нагрузки от подвесного оборудования (комбинация нагружения I, рис. 2.15а);

– расчетная постоянная  $g$  нагрузка на всем пролете арки, переменная (снеговая)  $q$  нагрузка, распределенная по треугольникам, с разными значениями на каждой половине пролета или части его, а также переменные нагрузки от подвесного оборудования (комбинация нагружения II, рис. 2.15б);

– расчетная постоянная  $g$  нагрузка на всем пролете арки, переменная (снеговая)  $q$  нагрузка, распределенная по треугольнику на половине пролета или части его, а также переменные нагрузки от подвесного оборудования (рекомендуемая комбинация нагружения III, рис. 2.15в);

– ветровая нагрузка в комбинации с постоянными и переменными нагрузками. Данную комбинацию нагружения выполняют в соответствии с [14, 16, 17].

Примечания

1 Сочетание нагрузок выполняют в соответствии с требованиями [10].

2 Схемы приложения ветровой нагрузки к арке, а также ее значения определяются в соответствии с требованиями и рекомендациями [14, 16].

3 Значения переменной нагрузки от подвесного оборудования и места ее приложения принимаются в соответствии с заданием на проектирование.

**2.3.14** Расчет предельных состояний несущей способности арок включает в себя:

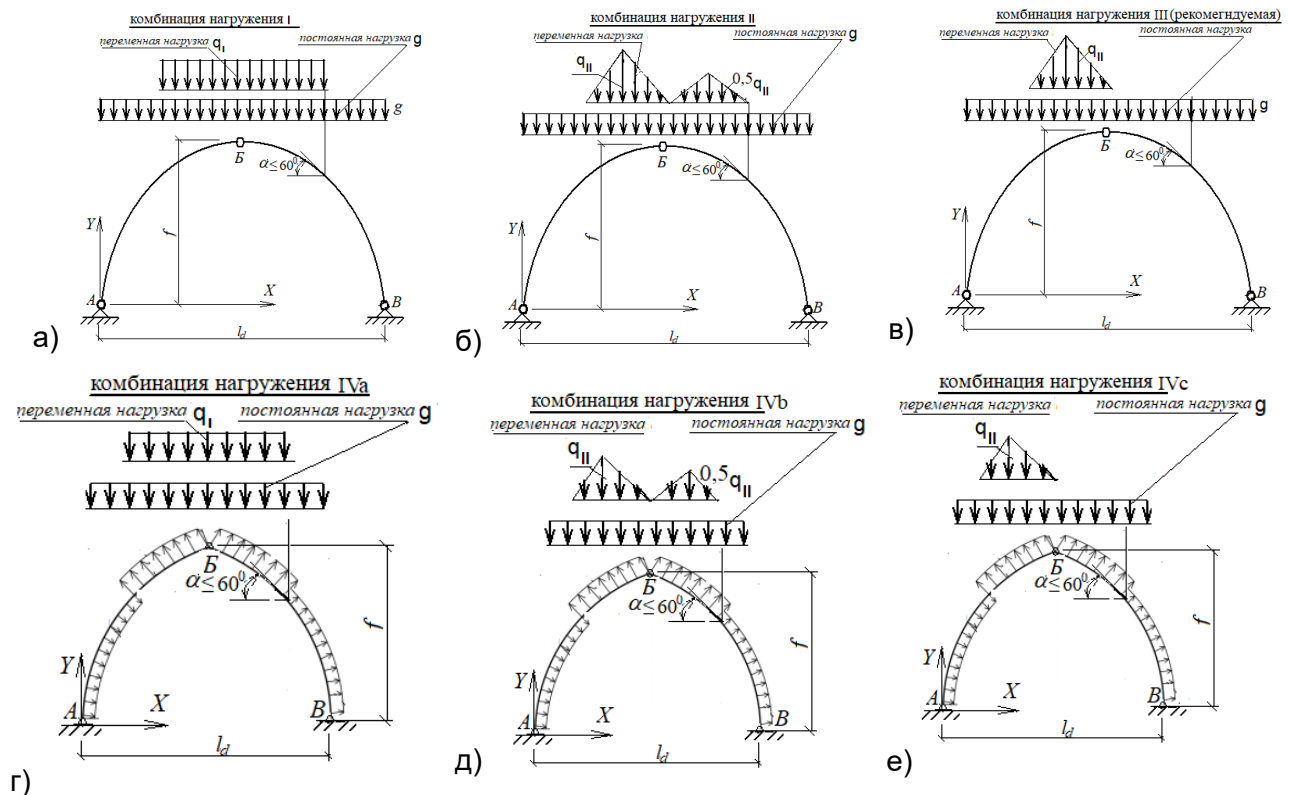
– проверку устойчивости положения арки или любой ее части (потеря статического равновесия), выполняют согласно правилам, установленным в [10];

– проверку устойчивости плоской формы деформирования арки (проверка устойчивости из плоскости кривизны), как сжато-изгибаемого элемента в соответствии с правилами раздела 7.5 [11];

– проверку устойчивости арки в плоскости ее кривизны, как сжато-изгибаемого элемента в соответствии с правилами раздела 7.5 [11];

– проверку сопротивления опорных площадок арок при сжатии древесины вдоль или под углом к волокнам, сопротивления сечений сдвигу вдоль волокон в опорных и коньковых узлах. Данную проверку выполняют в соответствии с правилами, установленными в п. 7.2.1, 7.3.3 и 7.6.2 [11];

– проверку прочности древесины в сечениях криволинейных участков от действия радиальных растягивающих поперек волокон напряжений, обусловленных действием положительных изгибающих моментов.



а) – комбинация нагрузок I (постоянная + переменная снеговая нагрузка);  
 б) – комбинация нагрузок II (постоянная + переменная снеговая нагрузка, распределенная по треугольникам); в) – рекомендуемая комбинация нагрузок III (постоянная + переменная снеговая нагрузка, распределенная по треугольникам на половине пролета);  
 г) – комбинация нагрузок IVa (постоянная + переменная снеговая нагрузка + ветровая нагрузка справа); д) – комбинация нагрузок IVb (постоянная + переменная снеговая нагрузка, распределенная по треугольникам + ветровая нагрузка справа);  
 е) – комбинация нагрузок IVc (постоянная + переменная снеговая нагрузка, распределенная по треугольникам на половине пролета) + ветровая справа)

**Рисунок 2.15 – Схемы нагружения высоких (стрельчатых) арок**

**2.3.15** Расчетным сечением арки для каждого сочетания нагрузок является сечение с наибольшим изгибающим моментом, для которого определяется расчетное значение напряжений. Положение расчетного сечения определяют аналитически или по эпюре изгибающих моментов для всей арки, а проверка нормальных напряжений от сжатия с изгибом производится в соответствии с правилами раздела 7.5 [11].

**2.3.16** Внутренние усилия в произвольном поперечном сечении арки зависят от угла  $\alpha$  между касательной и горизонталью.

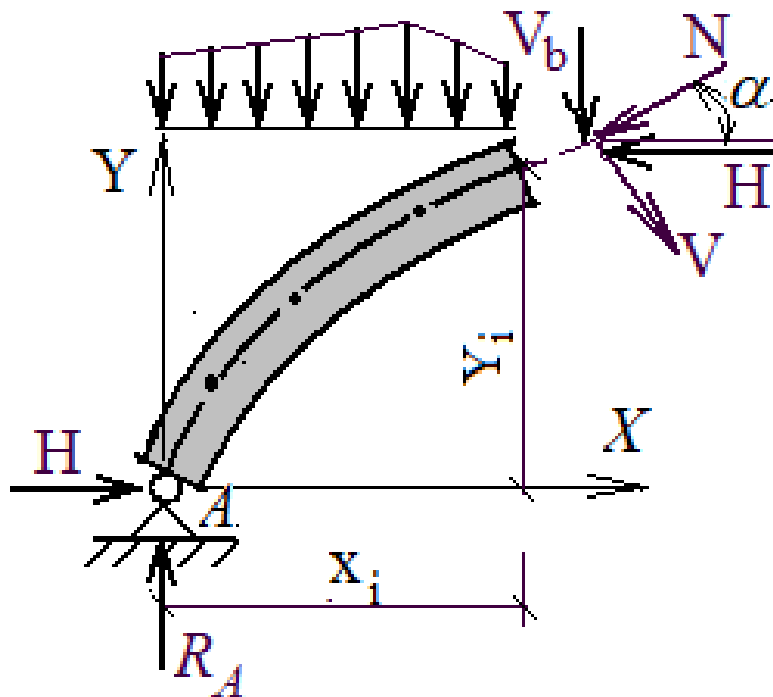
Аналитически нормальную  $N$  и поперечную  $V$  силы в поперечном сечении арки (рис. 2.16) определяют по формулам

$$N = H \cdot \cos \alpha + V_b \cdot \sin \alpha, \quad (2.22)$$

$$V = -H \cdot \sin \alpha + V_b \cdot \cos \alpha, \quad (2.23)$$

где  $H$  – горизонтальная составляющая в опорном узле арки (распор);

$V_b$  – поперечная сила в сечении шарнирно опертой балки пролетом, равным пролету арки при действии вертикальной нагрузки.



**Рисунок 2.16 – Схема определения внутренних усилий в произвольном сечении арки**

Координаты  $i$ -ой точки  $y_i$  на оси арок кругового и параболического очертаний (рисунок 2.16) при  $f/l \approx 1/6$  допускается определять по формуле

$$y_i = \frac{4 \cdot f}{l} \cdot \left( x_i - \frac{x_i^2}{l} \right), \quad (2.24)$$

где  $x_i$  – координата  $i$ -ой точки на нейтральной оси арки по направлению оси  $X$  от левой опоры арки;

$y_i$  – координата  $i$ -ой точки на нейтральной оси арки по направлению оси  $y$ .

**2.3.17** В трехшарнирной арке, нагруженной по схеме, приведенной на рисунке 2.14а, опорные реакции и внутренние усилия рассчитывают по формулам:

– величина вертикальной опорной реакции

$$R_A = R_B = \frac{(q_l + g) \cdot l}{2}; \quad (2.25)$$

– величина распора

$$H = \frac{(q_l + g) \cdot l^2}{8 \cdot f}; \quad (2.26)$$

– поперечная сила в опорном сечении ( $x = 0$ )

$$V_{x0} = -\frac{(q_l + g) \cdot l^2}{8 \cdot f} \cdot \sin \alpha_{x0} + \frac{(q_l + g) \cdot l}{2} \cdot \cos \alpha_{x0}. \quad (2.27)$$

Поперечная сила в коньке равняется нулю.

**2.3.18** При проверке сопротивления опорных площадок сжатию древесины под углом  $\alpha$  к волокнам и сдвигу вдоль волокон в сечениях опорных и коньковых узлов должны соблюдаться условия

$$N_{c,E,di} \leq N_{c,\alpha,R,di}, \quad (2.28)$$

$$V_{E,di} \leq V_{R,di}, \quad (2.29)$$

где  $N_{c,E,di}$  – расчетное значение сжимающего усилия, действующего в опорном или коньковом узле арки, обусловленного внешними воздействиями для  $i$ -ой комбинации (сочетания) нагружения;

$N_{c,\alpha,R,di}$  – расчетное значение сопротивления опорной площадки при сжатии древесины под углом  $\alpha$  к волокнам, определяемое по формуле (2.30) настоящего пособия;

$V_{E,di}$  – расчетное значение сдвигающего усилия в сечении опорного или конькового узла полуарки, обусловленного внешними воздействиями для  $i$ -ой комбинации (сочетания) нагружения;

$V_{R,di}$  – расчетное значение сопротивления сдвигу в сечении опорного или конькового узла полуарки; определяют по формуле (2.34).

$$N_{c,\alpha,R,d} = A_d \cdot f_{c,\alpha,di}, \quad (2.30)$$

где  $A_d$  – расчетное значение площади опорной площадки торца полуарки в опорном или коньковом узле;

$f_{c,\alpha,di}$  – расчетное значение прочности древесины при сжатии древесины под углом  $\alpha$  к волокнам для  $i$ -ой комбинации (сочетания) нагружения; определяют по формуле (2.31).

$$f_{c,\alpha,di} = \frac{f_{c,0,di}}{\frac{f_{c,0,di}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,di}} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}, \quad (2.31)$$

здесь  $f_{c,0,di}$  – расчетное значение прочности древесины арки при сжатии вдоль волокон для  $i$ -ой комбинации (сочетания) нагружения, определяемое по формуле (2.32);

$f_{c,90,d}$  – расчетное значение прочности древесины арки при сжатии поперек волокон для  $i$ -ой комбинации (сочетания) нагружения, определяемое по формуле (2.33);

$\alpha$  – угол между направлением усилия и волокнами древесины;

$k_{c,90}$  – коэффициент, учитывающий поддерживающее влияние слоев, находящихся вблизи граней опорной площадки, на прочность древесины при сжатии поперек волокон и принимаемый равным: для клееной древесины 1,75, а для пиломатериалов – 1,5.

$$f_{c,0,di} = \frac{k_{mod,i} \cdot f_{c,0,k} \cdot k_{sys}}{\gamma_M}, \quad (2.32)$$

$$f_{c,90,di} = \frac{k_{mod,i} \cdot f_{c,90,k}}{\gamma_M}, \quad (2.33)$$

здесь  $f_{c,0,k}$  – характеристическое значение прочности соответствующего материала арки при сжатии вдоль волокон древесины, принимаемое соответственно из таблиц Б.1 – Б.4 приложения Б настоящего пособия;

$f_{c,90,k}$  – характеристическое значение прочности соответствующего материала арки при сжатии поперек волокон, принимаемое соответственно из таблиц Б.1 – Б.4 приложения Б настоящего пособия;

$k_{mod,i}$  – коэффициент модификации; принимают по таблице А.2 приложения А настоящего пособия;

$k_{sys}$  – коэффициент, учитывающий перераспределение усилий (напряжений) между элементами;

$\gamma_M$  – частный коэффициент свойств материала или изделий; принимают по таблице А.1 приложения А настоящего пособия.

Расчетное значение сопротивления сдвигу  $V_{R,di}$  в сечении опорного или конькового узлов арок для  $i$ -ой комбинации (сочетания) нагружения следует определять по формуле

$$V_{R,di} = \frac{I_{br} \cdot b_{ef} \cdot f_{v,di}}{S_{br}}, \quad (2.34)$$

где  $J_{br}$  – момент инерции брутто поперечного сечения элемента относительно нейтральной оси;

$b_{ef}$  – расчетное значение ширины поперечного сечения в опорном или коньковом узле полуарки, определяют по формуле (2.35);

$f_{v,di}$  – расчетное значение прочности древесины при сдвиге (скалывании) вдоль волокон для  $i$ -ой комбинации (сочетания) нагружения, определяют по формуле (2.36);

$S_{br}$  – статический момент брутто сдвигаемой части поперечного сечения арки относительно нейтральной оси.

Расчетное значение ширины поперечного сечения  $b_{ef}$  в зоне опорного или конькового узла арки определяют по формуле

$$b_{ef} = b \cdot k_{cr}, \quad (2.35)$$

где  $b$  – ширина поперечного сечения полуарки;

$k_{cr}$  – коэффициент, учитывающий снижение сопротивления сечению сдвигу из-за возможного образования поверхностных трещин в опорных сечениях арок, принимают равным 0,67 для арок из клееной древесины и 1,0 для арок из других материалов на основе древесины.

Расчетное значение прочности древесины при сдвиге (скалывании) вдоль волокон  $f_{v,di}$  для  $i$ -ой комбинации (сочетания) нагружения определяют по формуле

$$f_{v,di} = \frac{k_{mod,i} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M}, \quad (2.36)$$

где  $k_{mod,i}$  – коэффициент модификации для  $i$ -ой комбинации (сочетания) нагружения, принимаемый по таблице А.2 приложения А настоящего пособия;

$f_{v,k}$  – характеристическое значение прочности древесины при сдвиге вдоль волокон или материала на ее основе, принимают по таблицам по таблицам Б.1 – Б.4 приложения Б настоящего пособия;

$\gamma_M$  – частный коэффициент свойств материала или изделий; принимают по таблице А.1 приложения А настоящего пособия.

**2.3.20** При проверке прочности древесины от действия растягивающих поперек волокон радиальных  $\sigma_{t,90,di}$  напряжений, возникающих в сечениях криволинейных участков арок от действия положительных изгибающих моментов, должно выполняться условие

$$\frac{\sigma_{t,90,di}}{k_{dis} \cdot k_{vol,i} \cdot f_{t,90,di}} \leq 1, \quad (2.37)$$

где  $\sigma_{t,90,di}$  – расчетное значение радиального напряжения, растягивающего древесину поперек волокон для  $i$ -ой комбинации (сочетания) нагружения, определяют по формуле (2.38);

$f_{t,90,di}$  – расчетное значение прочности клееной древесины арки при растяжении поперек волокон для  $i$ -ой комбинации (сочетания) нагружения, определяют по формуле (2.42) настоящих строительных правил;

$k_{dis}$  – коэффициент, учитывающий распределение напряжений в зоне действия изгибающего момента на криволинейном участке, который для гнутоклееных арок равен 1,4;

$k_{vol,i}$  – коэффициент, учитывающий отношение базового  $V_0$  объема древесины к  $V_{arch,i}$  объему древесины арки на криволинейном участке длиной  $l_{curve,i}$ , где имеет место действия положительного изгибающего  $M_{Ed}$  момента, вызывающего растяжение древесины поперек волокон для  $i$ -ой комбинации (сочетания) нагружения, определяемый по формуле (2.40).

Расчетное значение радиального  $\sigma_{t,90,di}$  напряжения, растягивающего древесину поперек волокон для  $i$ -ой комбинации (сочетания) нагружения, определяют по формуле

$$\sigma_{t,90,di} = k_{curve,t} \cdot \frac{6 \cdot M_{E,di,max}}{b \cdot h^2}, \quad (2.38)$$

где  $k_{curve,t}$  – коэффициент, определяемый по формуле (2.39);

$M_{E,di,max}$  – максимальное значение изгибающего момента на участке арки длиной  $l_{curve,i}$  для  $i$ -ой комбинации (сочетания) нагружения;

$b$  – ширина поперечного сечения арки;

$h$  – высота поперечного сечения арки.

$$k_{curve,t} = \frac{h}{4 \cdot (R + 0,5 \cdot h)}, \quad (2.39)$$

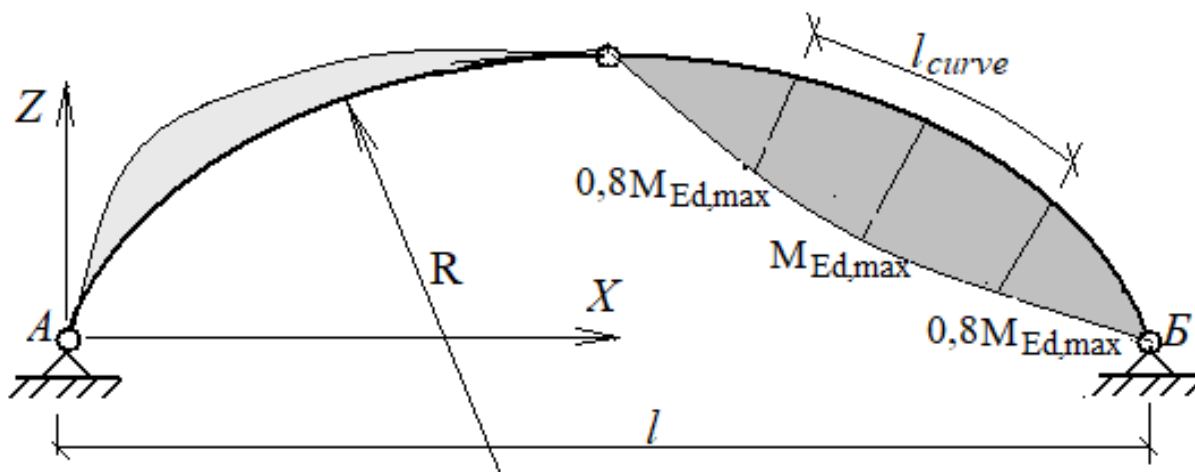
здесь  $R$  – радиус дуги арки на участке длиной  $l_{curve,i}$ ;

$h$  – высота поперечного сечения арки на участке длиной  $l_{curve,i}$ .

$$k_{vol,i} = \left( \frac{V_0}{V_{arch,i}} \right)^{0,2}, \quad (2.40)$$

здесь  $V_0$  – базовый объем древесины, принимаемый равным 0,01 м<sup>3</sup>;

$V_{arch,i}$  – объем древесины арки на криволинейном участке длиной  $l_{curve,i}$  (рисунок 2.17), где имеет место действия положительного изгибающего  $M_{Ed}$  момента для  $i$ -ой комбинации (сочетания) нагружения, вызывающего растяжение древесины поперек волокон, определяемый по формуле (2.41).



**Рисунок 2.17 – Схема определения расчетной длины криволинейного участка арки, где имеет место действие  $\sigma_{t,90,d}$  напряжений**

$$V_{arch,i} = A \cdot l_{curve,i}, \quad (2.41)$$

здесь  $A$  – площадь поперечного сечения арки на участке длиной  $l_{curve}$ .

Расчетное значение прочности древесины арки при растяжении поперек волокон; определяют по формуле

$$f_{t,90,di} = \frac{k_{mod,i} \cdot k_{sys} \cdot f_{t,90,k}}{\gamma_M}, \quad (2.42)$$

**2.3.21** Проверку устойчивости арки в плоскости ее изгиба выполняют, как сжато-изгибаемого элемента для всех схем нагружения (рис. 2.14 и рис. 2.15).

**2.3.21.1** Для симметричной схемы нагружения арки в сечении с наибольшим расчетным значением изгибающего  $M_{E,di,y}$  момента определяют расчетные значения нормальных  $\sigma_{c,0,di}$  и изгибающих  $\sigma_{m,y,di}$  напряжений по формулам

$$\sigma_{c,0,di} = \frac{N_{E,di}}{A}, \quad (2.43)$$

$$\sigma_{m,y,di} = \frac{M_{E,di,y,max}}{I_y} \cdot \frac{h}{2}, \quad (2.44)$$

где  $N_{E,di}$  – расчетное значение сжимающего усилия в сечении, где имеет место действие в плоскости арки максимального изгибающего момента  $M_{E,di,y,max}$  для  $i$ -ой комбинации (сочетания) нагружения;

$A$  – площадь поперечного сечения арки;

$I_y$  – момент инерции поперечного сечения относительно оси  $y$ ;

$h$  – высота поперечного сечения арки.

Проверку устойчивости арки в ее плоскости, т. е. изгиба относительно оси  $y$ , выполняют по формуле (2.48), если значение приведенной гибкости  $\lambda_{rel,y} > 0,3$ , которое определяют по формуле (2.45).

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}, \quad (2.45)$$

где  $\lambda_y$  – гибкость арки относительно оси  $y$ , определяемая по формуле (2.46);

$E_{0,05}$  – 5 %-ный квантиль модуля упругости древесины арки принимают по таблицам Б.1– Б.3 приложения Б настоящего пособия.



Для прямоугольного сечения арки величину гибкости  $\lambda_y$  определяют по формуле

$$\lambda_y = \frac{l_{d,0,y}}{h \sqrt{12}}, \quad (2.46)$$

где  $l_{d,0,y}$  – расчетная длина полуарки, ориентировочно определяемая по формуле (2.47).

$$l_{d,0,y} = 1,25 \cdot \frac{S}{2}, \quad (2.47)$$

здесь  $S$  – длина дуги арки.

Устойчивость арки в плоскости ее изгиба при  $\lambda_{rel,y} > 0,3$  обеспечена, если выполняется условие

$$\frac{\sigma_{c,0,di}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,di}} + \frac{\sigma_{m,y,di} \cdot k_l}{f_{m,y,di}} \leq 1, \quad (2.48)$$

где  $\sigma_{c,0,di}$  – расчетное значение нормальных напряжений для  $i$ -ой комбинации (сочетания) нагружения, определяемое по формуле (2.43);

$\sigma_{m,y,di}$  – расчетное значение напряжений изгиба для  $i$ -ой комбинации (сочетания) нагружения, определенное по формуле (2.44);

$f_{c,0,di}$  – прочность древесины арки при сжатии вдоль волокон для  $i$ -ой комбинации (сочетания) нагружения, определяемая по формуле (2.32);

$f_{m,y,di}$  – расчетное значение прочности древесины арки при изгибе для  $i$ -ой комбинации (сочетания) нагружения, определяемая согласно [11];

$k_{c,y}$  – коэффициент продольного изгиба, значение которого определяют по формуле (2.49);

$k_l$  – коэффициент, учитывающий характер распределение нормальных напряжений от изгиба на кромках элемента, имеющего криволинейную форму, значение которого определяют по формуле (2.51).

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}}, \quad (2.49)$$

где  $k_y$  – коэффициент, значение которого определяют по формуле (2.50) настоящих строительных правил.

$$k_y = 0,5 \cdot \left[ 1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2 \right], \quad (2.50)$$

здесь  $\beta_c$  – коэффициент, значение которого, согласно п. (7.2.2) [11], принимают:

- для элементов из цельной древесины – 0,2;
- для элементов из клееной древесины и LVL – 0,1.

$$k_l = 1 + 0,35 \cdot \frac{h}{R} + 0,6 \cdot \left( \frac{h}{R} \right)^2, \quad (2.51)$$

где  $R$  – радиус дуги арки.

**2.3.21.2** Для несимметричной схемы нагружения арки расчетным является сечение с максимальным расчетным значением изгибающего  $M_{E,di,y}$  момента. Расчет выполняют с использованием программных комплексов или правил строительной механики.

**2.3.22** Проверку устойчивости арки из ее плоскости (потеря устойчивости плоской формы деформирования), выполняют как сжато-изгибаемого элемента для наиболее нагруженных сечений, в соответствии с разделом 7.5 [11], исходя из значений  $\lambda_{rel,y}$ ,  $\lambda_{rel,z}$  и  $\lambda_{rel,m}$ .

Устойчивость плоской формы деформирования арки (устойчивость из плоскости) зависит от схем раскрепления в направлении перпендикулярном ее плоскости и расстояния  $l_{0,z}$  (длины участка) между точками раскрепления.

Расчетные значения нормальных и изгибающих напряжений определяют в сечении арки с максимальным расчетным значением изгибающего  $M_{E,di}$  и продольной  $N_{E,di}$  силы, используя формулы (2.43) и (2.44).

Для проверки устойчивости плоской формы деформирования арки (устойчивости из плоскости) предварительно определяют:

– величину критического  $\sigma_{crit,z}$  напряжения

$$\sigma_{crit,z} = \frac{\pi^2 \cdot E_{0,05} \cdot I_z}{A \cdot l_{0,z}^2}, \quad (2.52)$$

где  $I_z$  – момент инерции поперечного сечения относительно оси  $z$ ;

– величину приведенной гибкости

$$\lambda_{rel,z} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{crit,z}}}; \quad (2.53)$$

– величину коэффициента продольного изгиба  $k_{c,z}$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}}, \quad (2.54)$$

где  $k_z$  – коэффициент, определяемый по формуле (2.55)

$$k_z = 0,5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2], \quad (2.55)$$

здесь  $\beta_c$  – коэффициент, значение которого принимают: для элементов из цельной древесины – 0,2, а для элементов из клееной древесины и LVL – 0,1.

– величину критического напряжения от изгиба относительно оси  $z$  и действию постоянного момента  $M_y$  на участке  $l_{0,z}$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{\pi \cdot \sqrt{E_{0,05} \cdot I_z \cdot G_{0,05} \cdot I_{tor}}}{I_{ef,z} \cdot I_y \cdot \frac{2}{h}}, \quad (2.56)$$

где  $I_y$  и  $I_z$  моменты инерции поперечного сечения относительно оси  $y$  и оси  $z$ ;

$E_{0,05}$  – 5 %-ный квантиль модуля упругости древесины вдоль волокон для цельной или клееной древесины, принимают соответственно из таблиц Б.1 – Б.4 приложения Б настоящего пособия;

$G_{0,05}$  – 5 %-ный квантиль модуля сдвига древесины вдоль волокон для цельной или клееной древесины, принимают из таблиц Б.1 – Б.4 приложения Б настоящего пособия;

$l_{ef,z}$  – расчетная (эффективная) длина участка устанавливается с учетом требований п. 7.3.8 [11];

$I_{tor}$  – момент инерции прямоугольного сплошного поперечного сечения арки при кручении, определяемый по формуле

$$I_{tor} = k \cdot h \cdot b^3,$$

здесь  $k$  – коэффициент, принимаемый из таблицы 2.1;

$h$  – высота поперечного сечения арки;

$b$  – ширина поперечного сечения арки.

**Таблица 2.1. – Значения коэффициента  $k$  для расчета прямоугольных сечений на кручение**

$h/b$	1,0	1,5	1,75	2,0	2,5	3,0	4,0	6,0	8,0	10,0	$\infty$
$k$	0,208	0,231	0,239	0,246	0,258	0,267	0,282	0,299	0,307	0,313	1/3

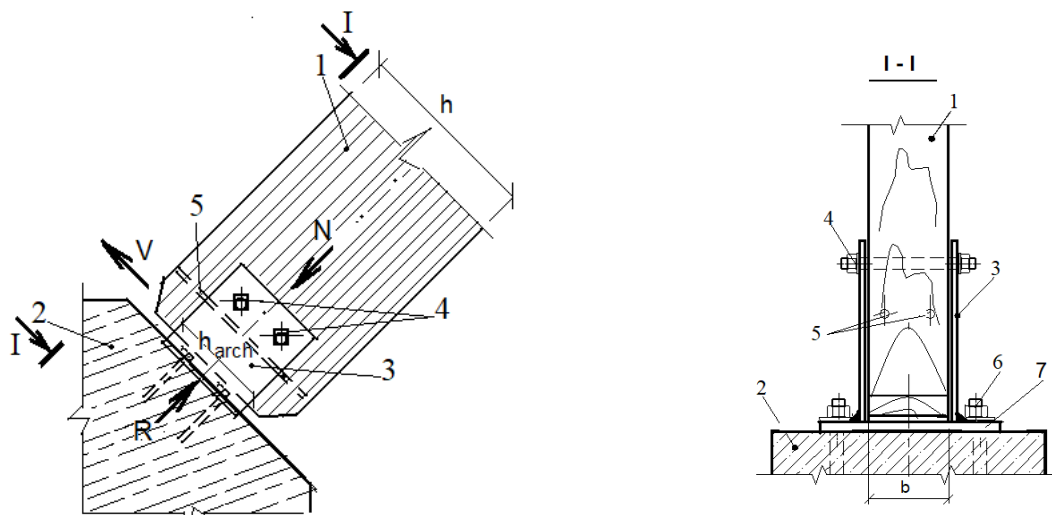
– значение коэффициента  $k_{crit}$  в зависимости от величины  $\lambda_{rel,m}$ , используя формулу (7.34) [11];

– для корректировки расчетных значений изгибающих  $\sigma_{m,y,di}$  напряжений, возникающих на кромках арки (криволинейного участка) в расчетном сечении, определяют значение коэффициента  $k_i$  по формуле (2.51).

## 2.4 Рекомендации по конструированию и расчету узлов арок

**2.4.1** При пролетах арок менее 24 м опорные узлы выполняют, как правило, в виде лобовых упоров с использованием металлических башмаков, изготовленных из стальных профилей или стальных листов, соединенных между собой с помощью электросварки (рис. 2.18).

Опорные башмаки данных арок состоят из опорной плиты 7 с отверстиями для анкерных болтов 6 и двух вертикальных 3 пластин (фасонок) с отверстиями в которые усаживаются болты крепления башмака к полуарке 1. Торцы полуарок упираются лобовым упором в опорную плиту. Расстояние между боковыми пластинами 3 башмака принимают равным ширине сечения полуарки. Для уменьшения сдвигающих усилий в анкерных болтах опорный башмак устанавливается на наклонную поверхность фундамента, параллельную опорному сечению полуарок.



1 – дощатоклееная арка; 2 – фундамент; 3 – стальные боковые пластины; 4 – стяжные шпильки (глухарь); 5 – вклеенные или ввинченные стержни; 6 – анкерные болты; 7 – опорная плита

**Рисунок 2.18 – Схема узла опирания арки непосредственным лобовым упором на железобетонную опору**

Величину опорной площадки ( $h_{arch} \times b$ ) в узле арки (рис. 2.18) определяют исходя из условия обеспечения прочности древесины при сжатии вдоль или под углом  $\alpha$  к волокнам при действии сжимающего  $N$  усилия. Усилие  $V$  сдвига (поперечная сила) воспринимается анкерными болтами 6 (рис. 2.18) фундамента 2 или сварными швами, если боковые пластины 3 соединяют с помощью сварки с закладной деталями фундамента.

Количество нагелей (болтов) 4, соединяющих арку с боковыми пластинами 3 определяют расчетом в зависимости от величины сдвигающего усилия  $V$ , как для двухсрезных нагельных соединений в соответствии с правилами, установленными в разделе 9 [11].

Для предотвращения возможного появления продольных трещин в древесине арок опорных зон при изменении температурно-влажностных условий в процессе эксплуатации, конструктивно устанавливают клеенные или ввинченные стержни 5 (рис. 2.18). Стержни 5 располагают симметрично по ширине поперечного сечения арки. Расстановку стержней выполняют в соответствии с правилами, установленными в разделе 9.4 и 9.6 [11].

**2.4.2** В сечениях арок, в которых возникают изгибающие моменты разного знака, а поперечные силы незначительны по своей величине (арки стрельчатого и сегментного очертаний), опорные узлы следует центрировать по осям полуарок и перпендикулярным расположением опорной плиты башмака.

**2.4.3** Узлы треугольных арок, в сечениях которых действуют в основном положительные изгибающие моменты и значительные поперечные силы, центрируются по осям, расположенным с эксцентриситетом относительно оси полуарок, а опорный лист башмака располагается перпендикулярно равнодействующей вертикальной  $V$  и горизонтальной  $N$  опорных реакций или продольной и поперечной силам в узле (рис. 2.19).

**2.4.4** При пролетах арок 24 м и более опорные узлы проектируют в виде классических шарниров (рис. 2.2) с использованием стальных башмаков или клеенных стержней, соединенных со стальными пластинами башмаков.

**2.4.5** Для предотвращения древесины арок от конденсационного увлажнения стальные поверхности башмаков отделяются от древесины слоем гидроизоляции, нанесенной на контактирующую с башмаком поверхность древесины.

**2.4.6** При проектировании опорного и коньковых узлов арки должны быть выполнены проверки предельных состояний несущей способности их конструктивных элементов включающие:

– проверку сопротивления опорной площадки полуарки сжатию древесины под углом  $\alpha$  к волокнам древесины (рис. 2.19);

$$N_{R,d} \geq N_{\max,c,\alpha,d}, \quad (2.57)$$

где  $N_{\max,c,\alpha,d}$  – максимальное расчетное значение равнодействующей опорных усилий, вызывающей сжатие древесины полуарки под углом  $\alpha$  к волокнам, определяемое:

а) для сегментных и стрельчатых арок, когда поверхность опорной площадки перпендикулярна направлению волокон древесины элемента (полуарки)

$$N_{\max,c,\alpha,d} = N_{\max,c,0,d}, \quad (2.58)$$

здесь  $N_{\max,c,0,d}$  – максимальное расчетное значение продольной силы  $N$ , действующей вдоль волокон;

б) для треугольных арок, когда поверхность опорной площадки наклонена под углом  $\alpha$  к направлению волокон древесины элемента (полуарки)

$$N_{\max,c,\alpha,d} = \sqrt{N_{\max}^2 + V_{\max}^2}, \quad (2.59)$$

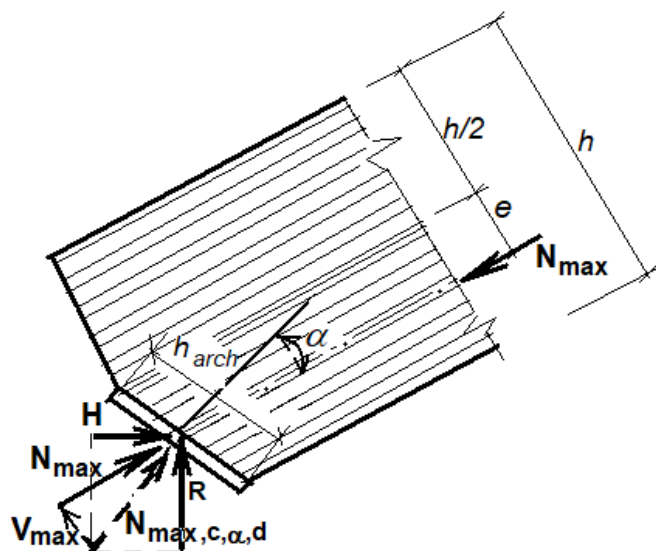
здесь  $N_{\max}$  и  $V_{\max}$  – максимальные расчетные значения опорных усилий, действующие в узле (рис. 2.19);

$\alpha$  – угол наклона равнодействующей  $N_{\max,c,\alpha,d}$  определяют из выражения

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{V_{\max}}{N_{\max}}; \quad (2.60)$$

– проверку количества нагелей (болтов), соединяющих арку с боковыми пластинами выполняют как для двухсрезного нагельного соединения от действия сдвигающего усилия  $V$ , в соответствии с правилами раздела 9 [11];

- проверку металлических деталей башмаков арки и их соединений выполняют на действие  $V_{max}$  и  $N_{max}$  в соответствии с правилами [19] и рекомендациями [17];
- проверку сопротивления опорной площадки фундамента локальному сжатию бетона сжатию от действия  $N_{max}$  выполняют в соответствии с правилами [22].



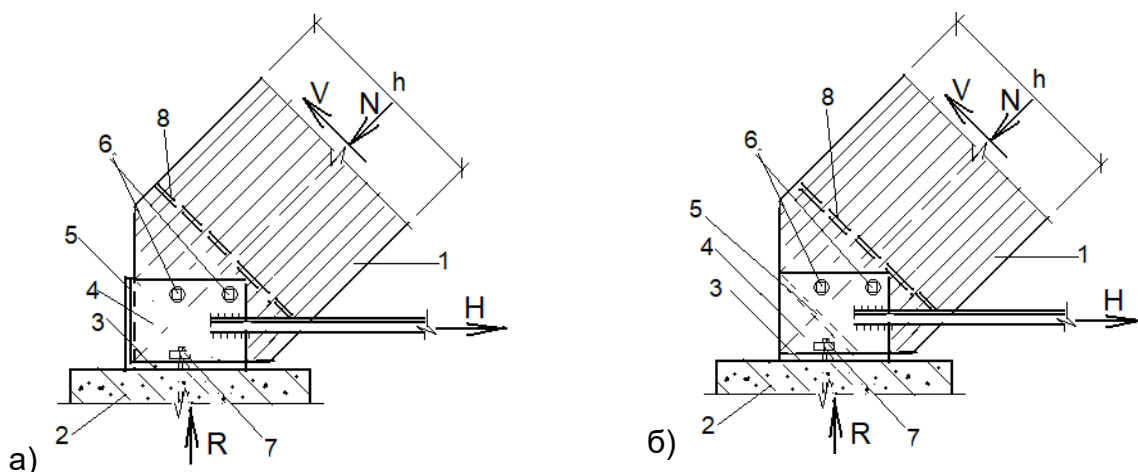
**Рисунок 2.19 – Общая схема усилий, возникающих в опорном узле арки**

**2.4.7** Конструктивное решение конькового узла арки, как и опорного, зависит от величины перекрываемого пролета, очертания арки, условий ее эксплуатации и нагрузок, действующих на арку.

При пролетах арок до 18 м коньковые узлы проектируют с использованием лобового упора торцов полуарок и боковых деревянных или стальных накладок, прикрепленных посредством механических связей к полуаркам (рис. 2.7).

В арках пролетами 18 м и более, как правило, коньковые узлы проектируют с использованием стальных башмаков (рис. 2.8 и 2.9).

**2.4.8** Опорные узлы арок с затяжками (рис. 2.20) выполняют, как правило, с использованием лобового упора и сварных металлических башмаков, отличающихся по своей конструкции от башмаков, используемых в опорных узлах арок без затяжек.



- 1 – арка; 2 – опора (колонна, стена и т. п.); 3 – горизонтальная опорная пластина;  
 4 – боковые пластины (фасонки); 5 – упорная пластина (диафрагма); 6 – болты;  
 7 – анкерные болты; 8 – вклеенные или ввинченные стержни;  
 а) – узел с раздельным восприятием распора и опорной реакции элементами башмака;  
 б) – узел с лобовой передачей усилия сжатия

**Рисунок 2.20 – Схема опорного узла арки с затяжкой**

В арках с затяжками опорная пластина башмака располагается горизонтально. Полуарка в опорном узле устанавливается своей горизонтальной поверхностью на опорную пластину. Горизонтальная пластина опорного башмака может располагаться между фасонками или же фасонки могут опираться на опорную пластину. Элементы затяжки крепятся к боковым пластинам (фасонкам), между которыми располагается упорная плита (диафрагма.) Наклон диафрагмы и центрирование узла производится аналогично, что и в узлах арок без затяжек. Если затяжка выполнена из древесины, ее располагают между фасонками и крепят с помощью болтов.

В некоторых конструктивных решениях опорных узлов арок с затяжками боковые фасонки соединяют с опорными пластинами, образуя цельный башмак с опорной плитой и упорной пластиной (диафрагмой).

Расчет узлов арок с затяжками аналогичен расчету узлов арок без затяжек с дополнительной проверкой самой затяжки и элементов ее крепления к башмакам (проверка сварных швов крепления затяжки к фасонкам).

### **3 Пример конструирования и расчета трехшарнирной дощатоклееной арки пролетом 60 м**

#### **Пример**

Запроектировать трехшарнирную дощатоклееную арку кругового очертания пролетом  $l = 60$  м для покрытия отапливаемого здания длиной  $L = 78$  м (рисунок 3.1). Район строительства г. Брест. Температурно-влажностные условия эксплуатации внутри здания: относительная влажность воздуха –  $63\% \div 67\%$ ; температура воздуха –  $18^{\circ}\text{C} \div 22^{\circ}\text{C}$ . Тип местности – III. Класс последствия для проектируемого здания устанавливается СС3.

#### **3.1 Исходные данные**

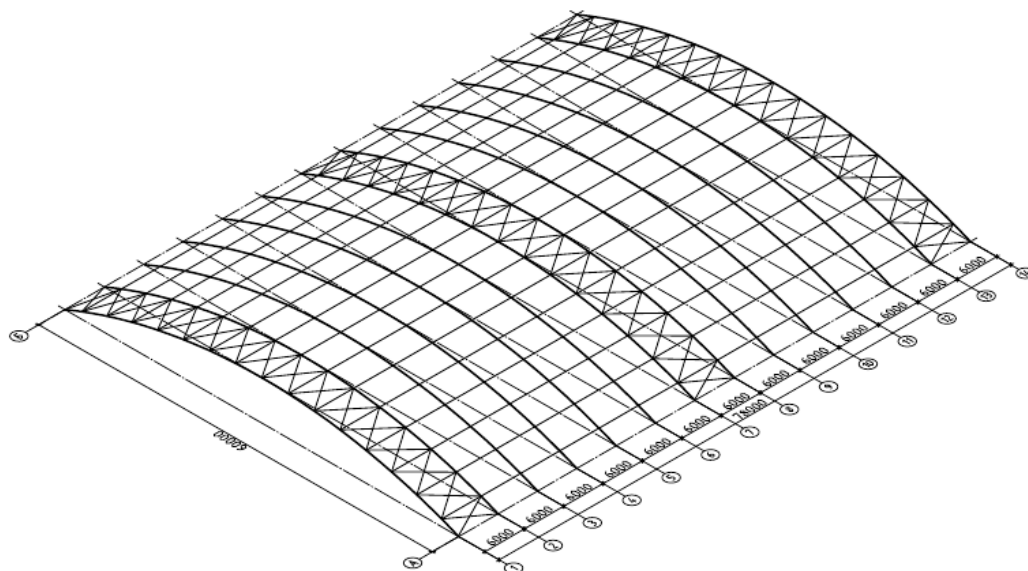
Арки прямоугольного сечения пролетом  $l = 60$  м при шаге  $B = 6$  м устанавливаются на железобетонные опоры (контрфорсы). Опорные и коньковые узлы арок выполнены с использованием стальных башмаков (рис. 2.2 и рис. 2.8). Высота опорных сечений полуарок  $h_{\text{arch}}$  (длина опорной пластины башмаков) составляет 500 мм. Высота от уровня чистого пола до опорного шарнира арки составляет 3 м (рис. 3.1б).

По архитектурным соображениям стрела  $f$  подъема арок принята равной 11 м, что составляет  $1/5,45$  пролета  $l$  и соответствует рекомендациям п. 2.3.1 настоящего пособия. Для изготовления арок используется однородная клееная древесина класса прочности GL 32h. Класс эксплуатации – 1 [11]. Класс последствия здания СС3.

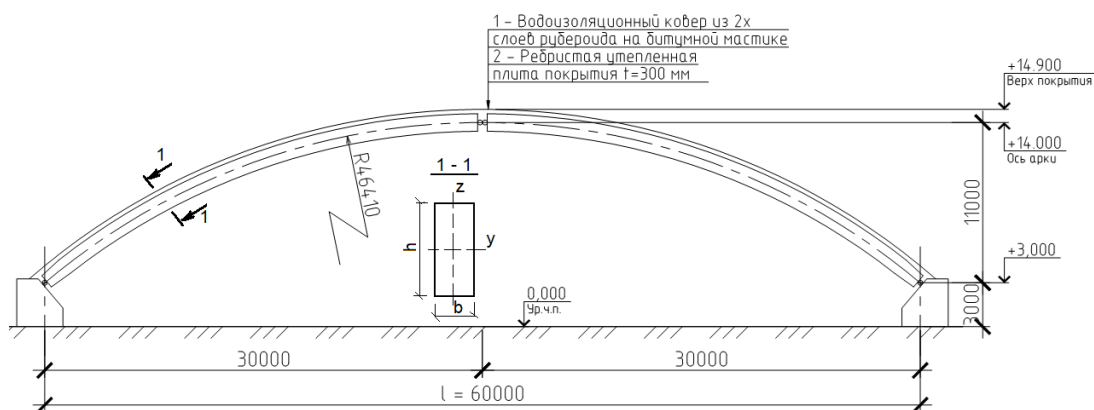
Ограждающая часть покрытия здания состоит из утепленных плит с дощатыми обшивками. Размер плит  $6 \times 3$  м, которые уложены на арки. Крепление плит к аркам осуществляется по углам плит с использованием винтов. Характеристическое значения веса плиты и кровли составляет  $g_{A,k} = 0,60$  кН/м<sup>2</sup>. Продольная устойчивость покрытия обеспечивается крайними деревянными ребрами плит покрытия и стальными диагональными связями с ячейкой  $6 \text{ м} \times 3 \text{ м}$ , которые расположены в торцах здания и через 30 м вдоль здания. Крайние деревянные ребра плит выполняют функции продольных связей между арками и надежно прикреплены к верхней грани арок.

Для решения данной задачи, связанной с конструированием и расчетом трехшарнирной арки кругового очертания пролетом 60 м, используем следующий алгоритм.

а)



б)



а) – схема покрытия; б) – поперечный разрез здания  
**Рисунок 3.1 – Монтажная схема и поперечный разрез здания**

### 3.2 Предварительное определение геометрических характеристик арки

В соответствии с техническим заданием на проектирование здания пролет арки  $l = 60$  м.

Стрела подъема арки в коньке  $f = 11$  м.

Исходя из условия, что  $h/l = 1/40 \div 1/60$ , высоту  $h$  поперечного сечения арки принимаем равной 1200 мм, а ширину –  $b = 250$  мм.

Определяем геометрические параметры арки в соответствии с рисунком. 2.13.

Радиус  $R$  кривизны дуги арки определяют формуле (2.18) настоящего пособия.

$$R = \frac{l^2 + 4f^2}{8f} = \frac{60^2 + 4 \cdot 11^2}{8 \cdot 11} = 46,41 \text{ м.}$$

Центральный угол  $\alpha$  дуги полуарки кругового очертания определяют по формуле (2.19).

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{l}{2 \cdot R}\right) = \arcsin\left(\frac{60}{2 \cdot 46,41}\right) = 40^{\circ}16'.$$

Используя формулу (2.21), определяют длину дуги  $S$  арки

$$S = \frac{\pi \cdot R \cdot 2 \cdot \alpha}{180} = \frac{3,14 \cdot 46,41 \cdot 2 \cdot 40^{\circ}16'}{180} = 65,2 \text{ м.}$$

Площадь поперечного сечения арки  $A = h \cdot b = 1200 \cdot 250 = 3 \cdot 10^5 \text{ мм}^2$ .

Момент инерции поперечного сечения арки относительно оси  $y$  (рисунок 3.1) определяют по формуле  $I_y = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{250 \cdot 1200^3}{12} = 36 \cdot 10^9 \text{ мм}^4$ .

Момент инерции  $I_z$  поперечного сечения арки относительно оси  $z$  (рисунок 3.1) определяем по формуле  $I_z = \frac{b^3 \cdot h}{12} = \frac{250^3 \cdot 1200}{12} = 15,625 \cdot 10^8 \text{ мм}^4$ .

Момент  $W_y$  сопротивления поперечного сечения арки относительно оси  $y$  определяем по формуле  $I_z = \frac{b^3 \cdot h}{12} = \frac{250^3 \cdot 1200}{12} = 15,625 \cdot 10^8 \text{ мм}^4$ .

Момент  $W_z$  сопротивления поперечного сечения арки относительно оси  $z$  определяем по формуле  $W_z = \frac{b^2 \cdot h}{6} = \frac{250^2 \cdot 1200}{6} = 12,5 \cdot 10^6 \text{ мм}^3$ .

### 3.3 Определение характеристик древесины арки

Для однородной клееной древесины класса GL 32h характеристические значения прочности и объемного веса принимаем из таблицы Б.2 приложения Б:

- |  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| – прочность при растяжении вдоль волокон                 | $f_{t,0,g,k} = 25,6 \text{ МПа};$    |
| – прочность при растяжении поперек волокон               | $f_{t,90,g,k} = 0,5 \text{ МПа};$    |
| – прочность при сжатии вдоль волокон                     | $f_{c,0,g,k} = 32 \text{ МПа};$      |
| – прочность при сжатии поперек волокон                   | $f_{c,90,g,k} = 2,5 \text{ МПа};$    |
| – прочность при изгибе                                   | $f_{m,g,k} = 32 \text{ МПа};$        |
| – прочность при скалывании                               | $f_{v,g,k} = 3,5 \text{ МПа};$       |
| – среднее значение модуля упругости вдоль волокон        | $E_{0,g,mean} = 14200 \text{ МПа};$  |
| – пятипроцентный квантиль модуля упругости вдоль волокон | $E_{0,g,05} = 11800 \text{ МПа};$    |
| – среднее значение модуля сдвига                         | $G_{g,mean} = 650 \text{ МПа};$      |
| – плотность  | $\rho_{g,k} = 440 \text{ кг / м}^3;$ |
| – объемный вес клееной древесины                         | $\gamma = 4,2 \text{ кН/м}^3$ .      |

### 3.4 Определение значений частных коэффициентов

Значения частных коэффициентов для воздействий при проверках предельных состояний несущей способности (ULS) в соответствии с [10] будут составлять:

- для постоянного воздействия  $\gamma_G = 1,35$ ;
- для переменного воздействия –  $\gamma_Q = 1,5$ ;
- для класса последствий СС 3 коэффициент  $k_{FI} = 1,1$ .

Для класса эксплуатации 1 значения коэффициентов  $k_{mod}$  модификации принимают из таблицы А.2 приложения А настоящего пособия, которые будут составлять:

- при действии на арку только постоянной нагрузки  $k_{mod} = 0,6$ ;
- при совместном действии на арку постоянной и среднесрочной (снеговой) нагрузок  $k_{mod} = 0,8$ ;
- при совместном действии на арку постоянной, среднесрочной (снеговой) и ветровой нагрузок  $k_{mod} = 0,9$ .

### 3.5 Определение характеристических и расчетных значений нагрузок

Для постоянной расчетной ситуации при расчете арок кругового и параболического очертаний учитывают два вида нагрузок:

- постоянную – от объемного веса арки и объемного веса плит покрытия с кровлей;
- переменную – от массы снега (среднесрочную) на покрытии.

#### 3.5.1 Постоянные нагрузки

В соответствии с требованиями [12] характеристическое значение погонной нагрузки на горизонтальную поверхность от объемного веса арки с учетом распределения по дуге арки определяем по формуле



$$g_{k1} = b \cdot h \cdot \gamma \cdot \frac{S}{l} = 0,25 \cdot 1,2 \cdot 4,2 \cdot \frac{65,2}{60} = 1,37 \text{ кН / м.}$$

Характеристическое значения веса плиты и кровли на горизонтальную поверхность с учетом расположения покрытия по дуге арки будет составлять

$$g_{\text{curve,A,k}} = g_{A,k} \cdot (S/l) = 0,60 \cdot (65,2/60) = 0,65 \text{ кН/м}^2.$$

Характеристическое значение равномерно распределенной нагрузки от собственного веса плит и кровли на единицу длины определяем по формуле

$$g_{k,2} = g_{\text{curve,A,k}} \cdot B = 0,65 \cdot 6 = 3,9 \text{ кН / м.}$$

Тогда согласно [10] и [11] расчетные значения постоянных нагрузок будут составлять:

– от объемного веса арки

$$g_{d,1} = k_{Fi} \cdot \gamma_G \cdot g_{k,1} = 1,1 \cdot 1,35 \cdot 1,37 = 2,03 \text{ кН / м};$$

– от собственного веса плит и кровли

$$g_{d,2} = k_{Fi} \cdot \gamma_G \cdot g_{k,2} = 1,1 \cdot 1,35 \cdot 3,9 = 5,79 \text{ кН / м.}$$

Расчетное значение постоянной нагрузки, действующей на арку, будет составлять

$$g = g_{d,1} + g_{d,2} = 2,03 + 5,79 = 7,82 \text{ кН / м.}$$

### 3.5.2 Снеговая нагрузка (переменная)

В соответствии с требованиями [13] (рисунок 1.5) г. Брест относится к снеговому району 1б. Тогда, в соответствии с таблицей 1.10, характеристическое значение снеговой нагрузки на грунт

$$S_k = 1,35 + 2,2 \cdot (A - 155) / 100 = 1,35 + 2,2 \cdot (141 - 155) / 100 = 1,042 \text{ кПа},$$

где  $A = 141$  м – отметка планировки над уровнем моря.

На основании рекомендаций п. 2.3.13 настоящего пособия возможны три варианта нагружения арки снеговой нагрузкой:

– для варианта нагружения 1.

Характеристическое значение снеговой нагрузки на покрытие

$$s_1 = \mu_1 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,042 = 0,834 \text{ кПа},$$

где  $\mu_1 = 0,8$  – коэффициент формы снеговых нагрузок;

$C_e = 1,0$  – коэффициент окружающей среды;

$C_t = 1,0$  – температурный коэффициент.

Для данного варианта нагружения арки расчетное значение снеговой равномерно распределенной нагрузки от снега будет составлять (рисунок 3.2)

$$q_{d,s1} = s_1 \cdot \gamma_Q \cdot k_{Fi} \cdot B = 0,834 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 6 = 8,26 \text{ кН / м.}$$

– для варианта нагружения 2.

Коэффициент формы снеговой нагрузки в точке 1 (рисунок 3.2)

$$\mu_2 = 0,2 + 10 \frac{h}{b} = 0,2 + 10 \cdot \frac{11}{60} = 10,38 > 2,0. \text{ Принимаем } \mu_2 = 2,0.$$

Характеристическое значение снеговой нагрузки на покрытие в точке 1

$$s_2 = \mu_2 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 2,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,042 = 2,084 \text{ кПа.}$$

Расчетное значение нагрузки от снега на арку в точке 1

$$q_{d,s2} = s_2 \cdot \gamma_Q \cdot k_{Fi} \cdot B = 2,084 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 6 = 20,63 \text{ кН / м.}$$

Расчетное значение нагрузки от снега на арку в точке А (рисунок 3.2)

$$q_{d,s2} = s_2 \cdot \gamma_Q \cdot k_{FI} \cdot B = 0,9675 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 6 = 9,58 \text{ кН / м.}$$

Характеристическое значение снеговой нагрузки на покрытие в точке 2 (рисунок 3.2)

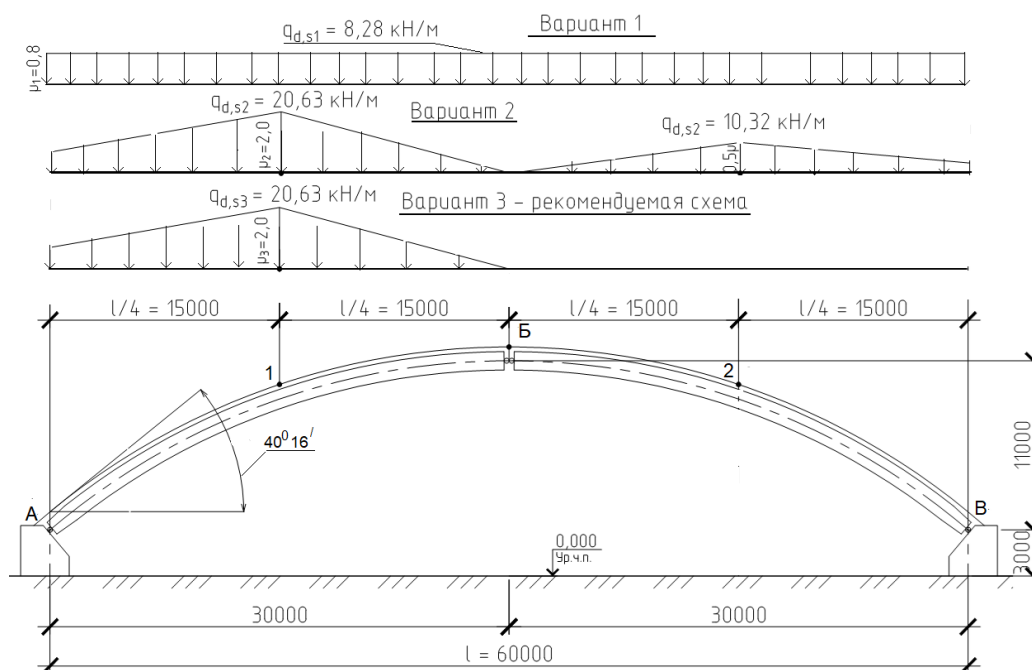
$$s_2 = 0,5 \cdot \mu_2 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,5 \cdot 2,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,042 = 1,042 \text{ кПа.}$$

Расчетное значение нагрузки от снега на арку в точке 2

$$q_{d,s2} = s_2 \cdot \gamma_Q \cdot k_{FI} \cdot B = 1,042 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 6 = 10,32 \text{ кН / м.}$$

Расчетное значение нагрузки от снега на арку в точке В (рисунок 3.2)

$$q_{d,s2} = s_2 \cdot \gamma_Q \cdot k_{FI} \cdot B = 0,484 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 6 = 4,79 \text{ кН / м.}$$



**Рисунок 3.2 – Схемы нагружения арки снеговой нагрузкой**

– для варианта нагружения 3 – рекомендуемая схема (случай II на 0,5 пролета).

Расчетное значение нагрузки от снега на арку в точке 1 (рисунок 3.2)

$$q_{d,s2} = s_2 \cdot \gamma_Q \cdot k_{FI} \cdot B = 2,084 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 6 = 20,63 \text{ кН / м.}$$

Расчетное значение нагрузки от снега на арку в точке А (рисунок 3.2)

$$q_{d,s2} = s_2 \cdot \gamma_Q \cdot k_{FI} \cdot B = 0,9675 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 6 = 9,58 \text{ кН / м.}$$

Примечание: Более подробно подсчет снеговой нагрузки на арочное покрытие приведен в [16, пример 2].

### 3.6 Статический расчет арки

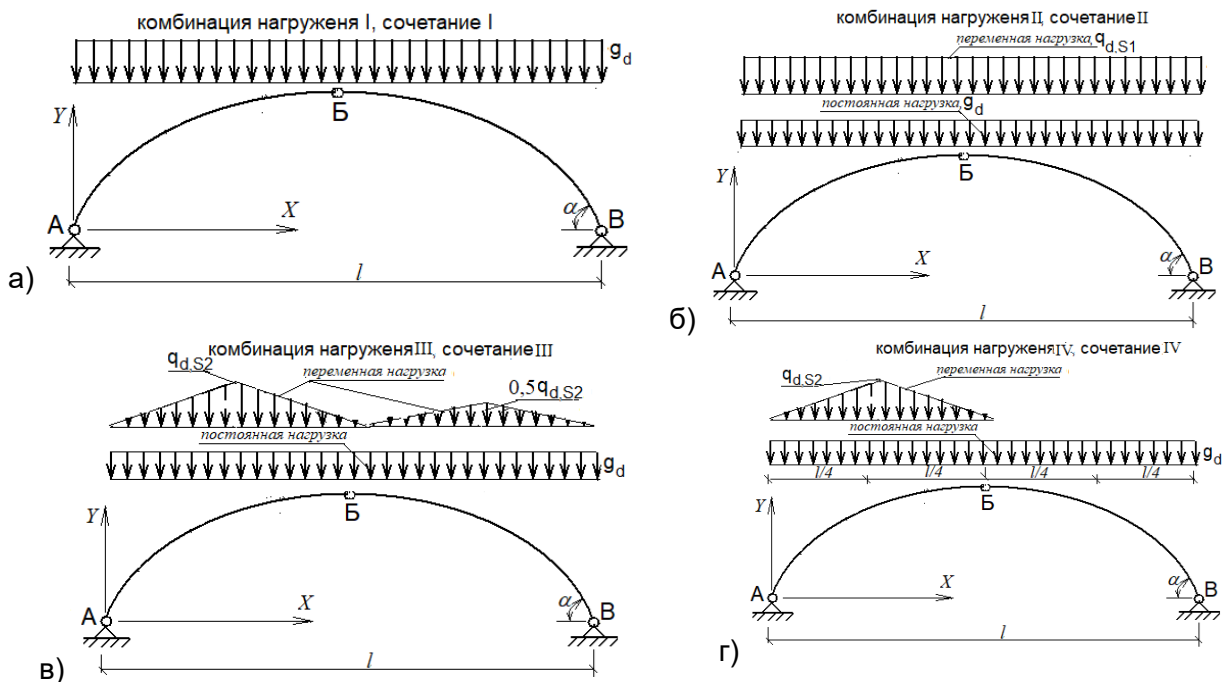
Статический расчет арки может быть выполнен по правилам строительной механики или численным методом с использованием программных комплексов. В данном примере статический расчет арки выполнялся в линейно-упругой постановке по правилам строительной механики. Результаты расчета с разбиением арки на сечения и координаты точек приведены в таблице В.1 приложения В настоящего пособия.

Исходными данными для выполнения статического являлись: геометрические характеристики поперечного сечения; пролет и стрела подъема арки и определенное выше среднее значение модуля упругости дощатоклееной древесины  $E_{0,g,mean} = 14200$  МПа, что соответствует классу прочности GL 32h.

Расчетные усилия определяли согласно требованиям [10].

В данном примере рассматривали четыре комбинации нагружения (рисунок 3.3):

- комбинация нагружения I (постоянная  $g_d$  нагрузка – собственный вес арки, плит и кровли);
- комбинация нагружения II (постоянная  $g_d$  нагрузка + симметричная снеговая (среднесрочная)  $q_{d,s1}$  нагрузка);



а) – комбинация нагружения I – постоянная нагрузка; б) – комбинация нагружения II – постоянная нагрузка + переменная, равномерно распределенная снеговая нагрузка; в) – комбинация нагружения III – постоянная нагрузка + переменная снеговая нагрузка, распределенная по треугольникам; г) – комбинация нагружения IV – постоянная нагрузка + переменная снеговая нагрузка, распределенная по треугольнику на половине пролета

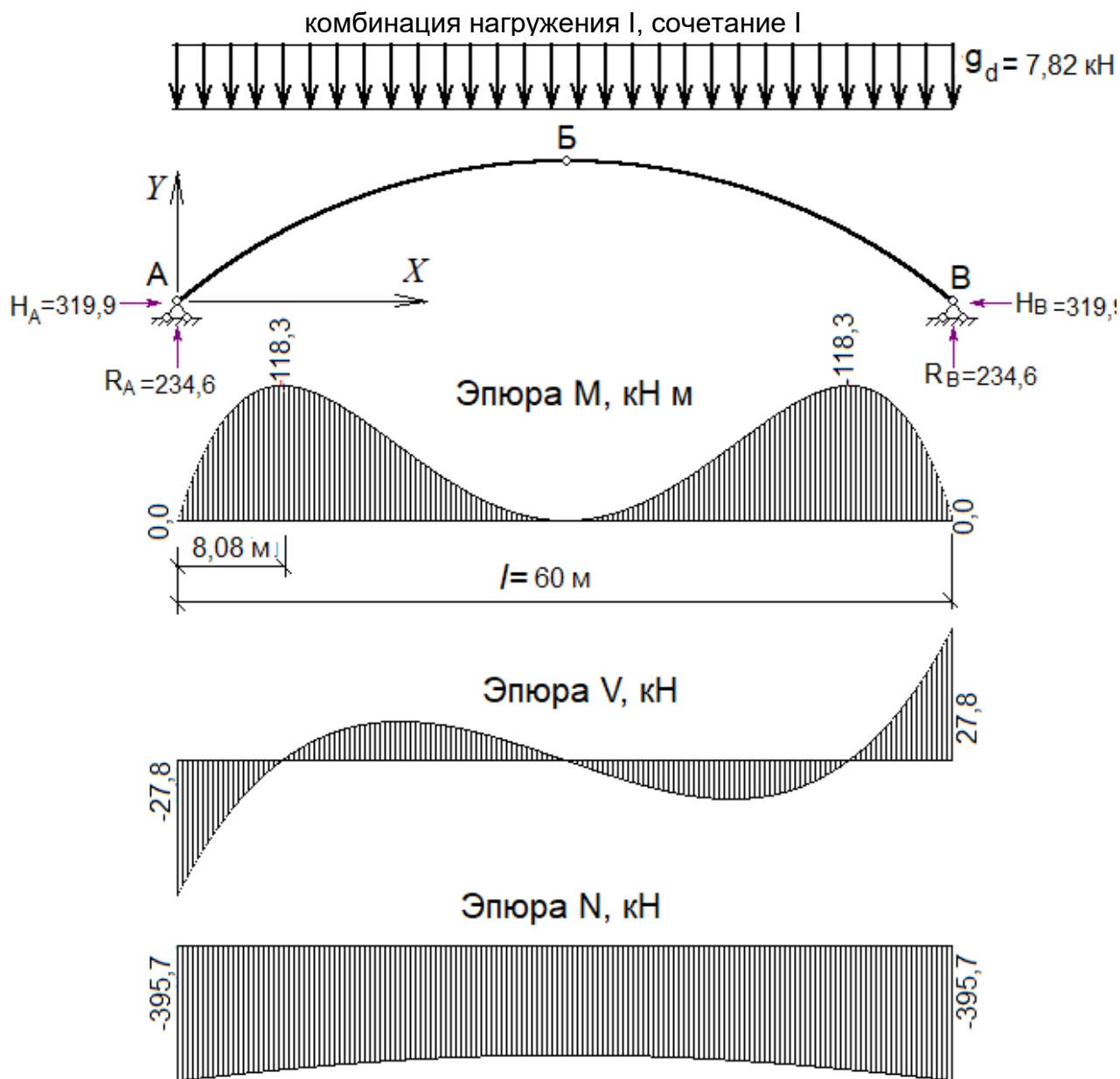
**Рисунок 3.3 – Схемы нагружения арки**

- комбинация нагружения III (постоянная  $g_d$  нагрузка + несимметричная снеговая (среднесрочная)  $q_{d,s2}$ , распределенная по треугольникам, нагрузка);
- комбинация нагружения IV – рекомендуемое нагружение (постоянная  $g_d$  нагрузка + несимметричная снеговая  $q_{d,s3}$  нагрузка, распределенная по треугольнику на половине пролета).

В результате статического расчета арки значения внутренних усилий в характерных сечениях опорных и коньковых зон арки, а также экстремальные (максимальные) значения изгибающих моментов и соответствующие им значения продольных усилий для соответствующих комбинаций нагружения, приведены в таблицах 3.1–3.4

**Таблица 3.1 – Расчетные значения внутренних усилий, возникающих в характерных сечениях арки, а также экстремальные значения моментов для комбинации нагружения I**

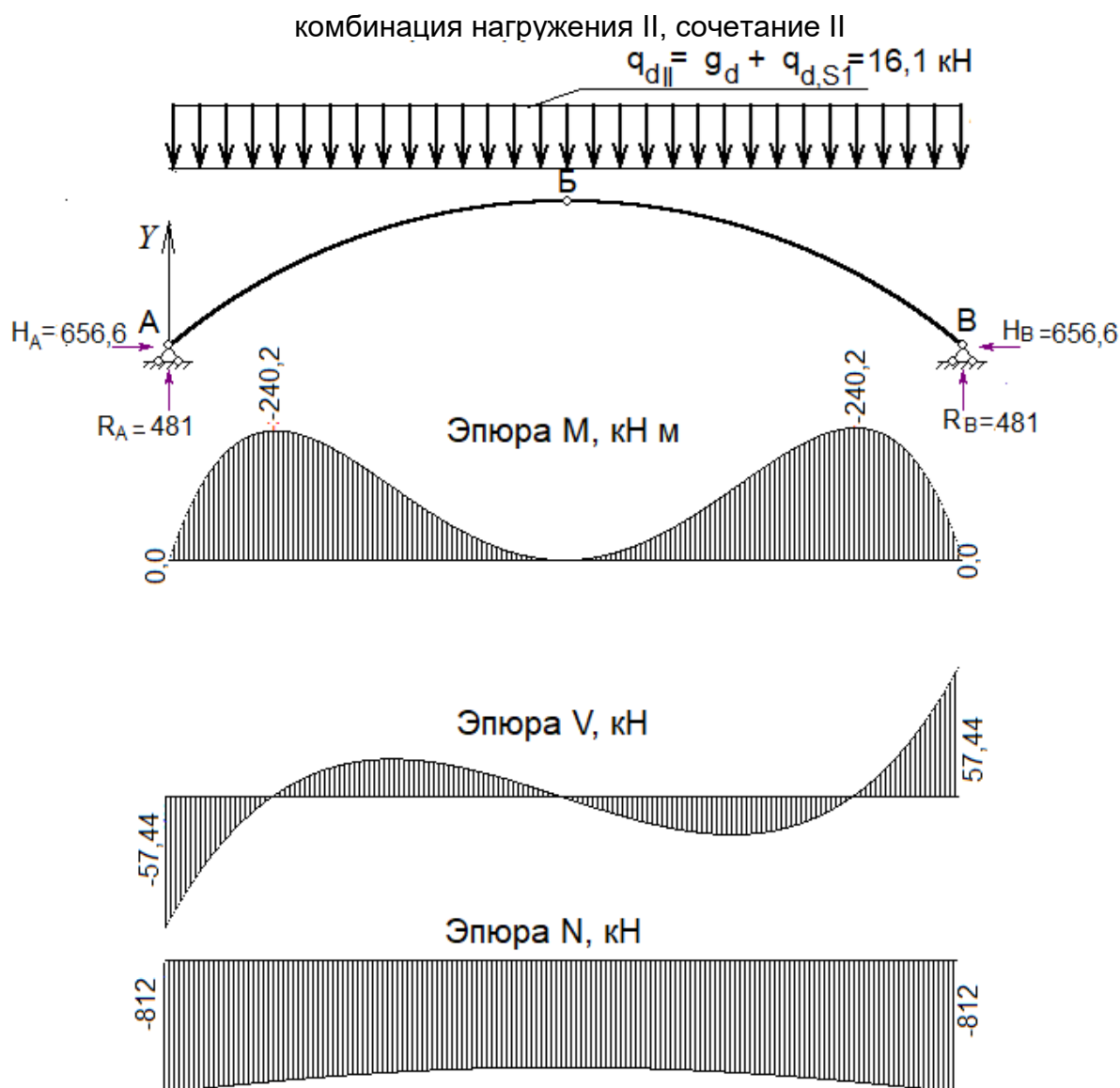
Координаты сечения		Значение внутреннего усилия		
X, м	Y, м	M, кН·м	N, кН	V, кН
Экстремальные значения изгибающего момента M (рис. 3.4)				
8,080	5,497	-118,3	-362,9	0,00
51,910	5,503	-118,3	-362,9	0,00
Значения внутренних усилий в опорных сечениях				
0,000	0,000	0,00	-395,7	-27,8
60,000	0,000	0,00	-395,7	27,8



**Рисунок 3.4 – Эпюры внутренних усилий в сечениях арки для комбинации нагружения I**

**Таблица 3.2 – Расчетные значения внутренних усилий, возникающих в характерных сечениях арки, а также экстремальные значения моментов для комбинации нагружения II**

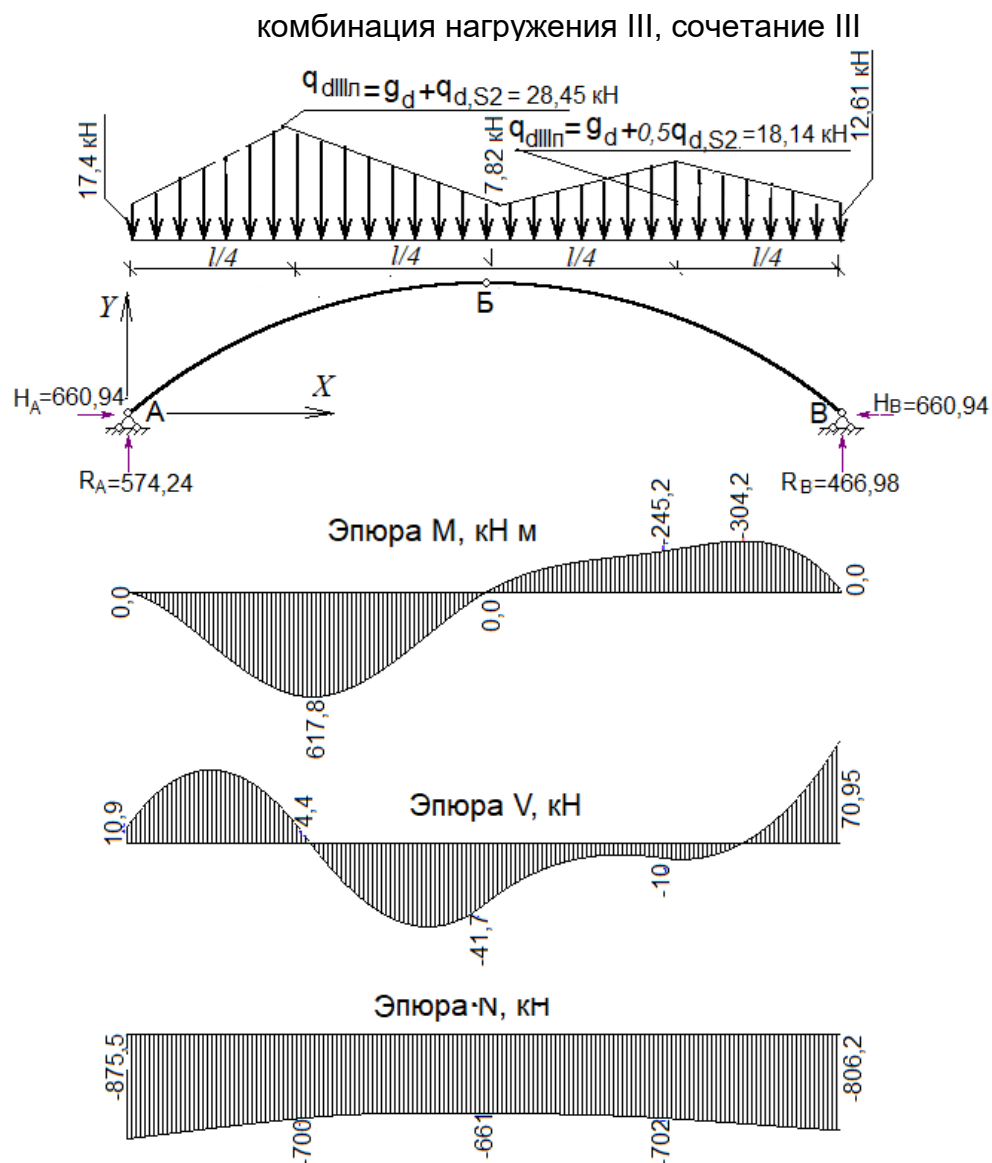
Координаты сечения		Значение внутреннего усилия		
X, м	Y, м	M, кН·м	N, кН	V, кН
Экстремальные значения изгибающего момента M (рис. 3.5)				
8,080	5,497	-240,2	-745,21	0,00
51,910	5,503	-240,2	-745,21	0,00
Значения внутренних усилий в опорных сечениях				
0,000	0,000	0,00	-812,0	-57,0
60,000	0,000	0,00	-812,0	57,0



**Рисунок 3.5 – Эюры внутренних усилий в сечениях арки для комбинации нагрузки II**

**Таблица 3.3 – Расчетные значения внутренних усилий, возникающих в характерных сечениях арки, а также экстремальные значения моментов для комбинации нагрузки III**

Координаты сечения		Значение внутреннего усилия		
X, м	Y, м	M, кН·м	N, кН	V, кН
Экстремальные значения изгибающего момента M (рис. 3.6)				
15,40	8,64	618,8	-696,3	0,00
51,70	5,61	-304,2	-747,7	0,00
Значения внутренних усилий в характерных сечениях				
0,000	0,000	0,00	-875,5	10,9
15,00	8,51	617,8	-700,0	4,4
30,0	11,0	0,0	-661,0	-41,65
45,0	8,51	-245,2	-701,85	-10,0
60,0	0,0	0,0	-806,15	70,95



**Рисунок 3.6 – Эпюры внутренних усилий в сечениях арки для комбинации нагружения III**

**Таблица 3.4 – Расчетные значения внутренних усилий, возникающих в характерных сечениях арки, а также экстремальные значения моментов для комбинации нагружения IV**

Координаты сечения		Значение внутреннего усилия		
X, м	Y, м	M, кН·м	N, кН	V, кН
Экстремальные значения эпюры изгибающего момента M (рис. 3.7)				
15,12	8,55	960,1	-577,74	0,00
47,12	7,73	-781,79	-588,77	0,00
Значения внутренних усилий в характерных сечениях				
0,00	0,00	0,00	-761,78	52,58
15,00	8,51	960,0	-579,0	1,68
30,00	11,00	0,00	-547,23	-83,35
60,00	0,00	0,00	-623,05	111,15

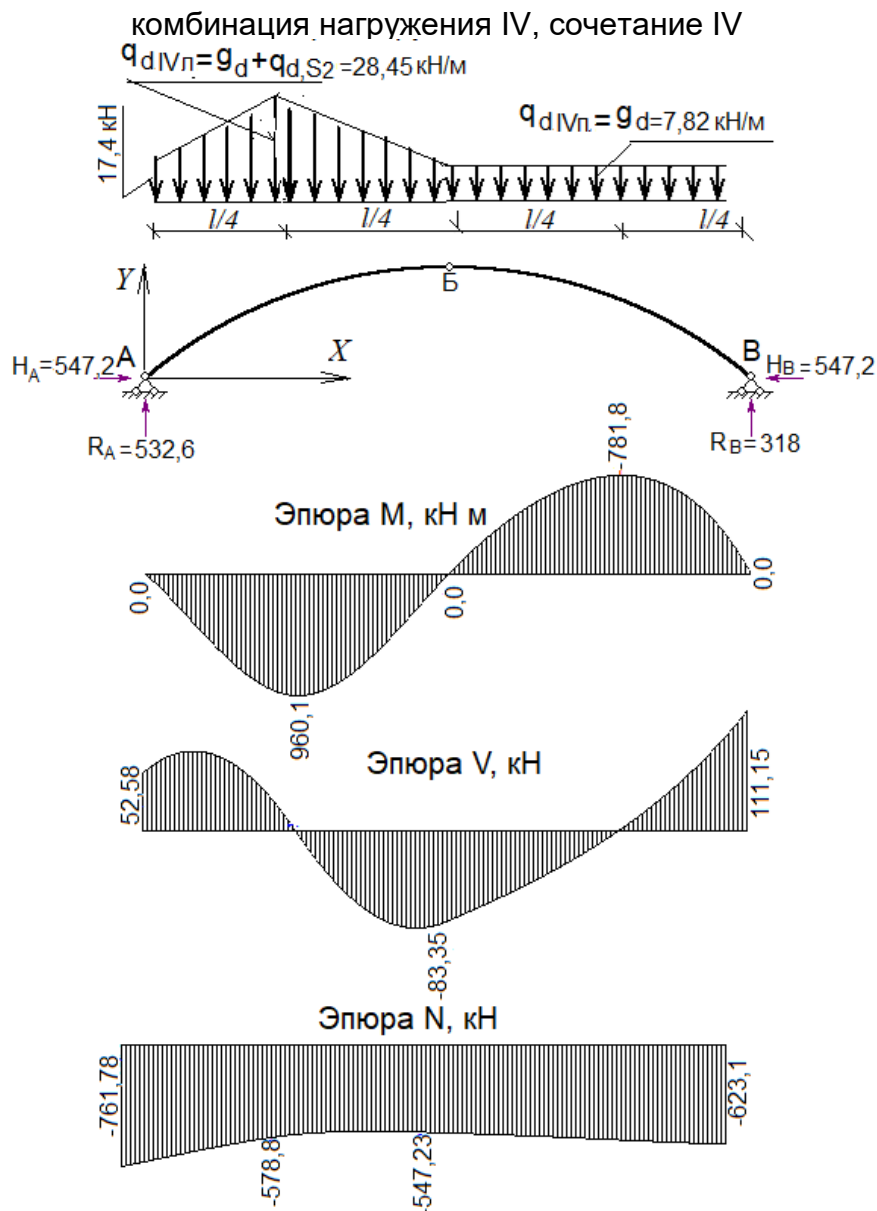


Рисунок 3.7 – Эпюры внутренних усилий в сечениях арки для комбинации нагружения III

### 3.7 Проверки предельных состояний несущей способности арки

#### 3.7.1 Проверка прочности древесины от действия растягивающих поперек волокон $\sigma_{t,90,d}$ напряжений

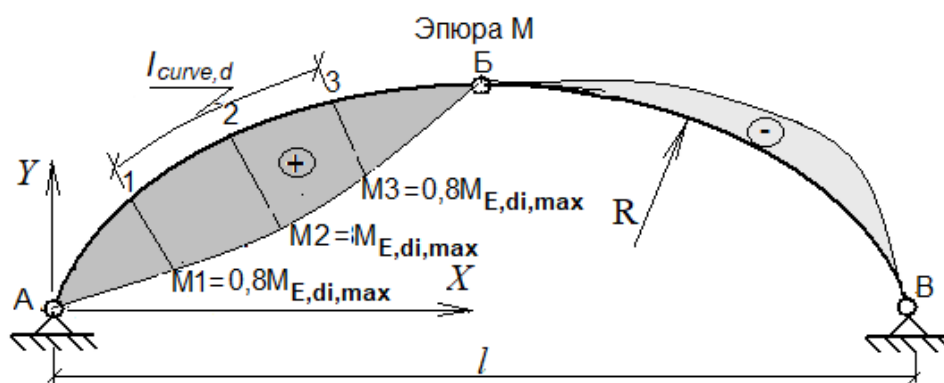
В сечениях арок, где имеет место действия положительных по значению изгибающих моментов, согласно рекомендациям п. 2.3.20 настоящего пособия, необходимо выполнять проверку по обеспечению прочности древесины от действия растягивающих поперек волокон  $\sigma_{t,90,d}$  напряжений, используя критериальную зависимость

$$\frac{\sigma_{t,90,d}}{k_{dis} \cdot k_{Vol} \cdot f_{t,90,d}} \leq 1.$$

Для проверки соблюдения данного критерия предварительно определяют расчетные длины криволинейных участков  $l_{curve,d}$  для комбинаций нагружения, при которых в сечениях арки древесина подвержена растяжению поперек волокон.

За расчетную длину  $l_{curve,d}$  криволинейного участка арки для конкретной комбинации нагружения принимают расстояние между сечением с максимальным положительным  $M_{E,d,max}$  моментом и сечениями, где значение изгибающего момента составляет  $0,8 \cdot M_{E,d,max}$  (рис. 3.8).

Максимальное расчетное значение положительного изгибающего момента, согласно результатам статического расчета, характерно для комбинаций нагружения III IV (см. табл. 3.4, 3.5 и рис. 3.6, 3.7).



**Рисунок 3.8 – Схема определения расчетной длины криволинейного участка арки пролетом 60 м, в сечениях которого имеет место действия растягивающих древесины поперек волокон  $\sigma_{t,90,d}$  напряжений**

Для комбинации нагружения III координаты сечения 2, где изгибающий момент достигает максимального значения, составляют:  $x_2 = 15,40$  м;  $y_2 = 8,64$  м. Значение  $M_2 = M_{E,dIII,max} = 618,77$  кН·м. Тогда в сечениях 1 и 3 значения изгибающих моментов в сечениях 1 и 3 должны быть близкими  $0,8 M_{E,dIII,max} = 0,8 \cdot 618,77 = 465,02$  кН·м. Сечения арки, в которых значения моментов близки к величине 465,02 кН·м принимаются за границы криволинейного участка. Координаты данных сечений определяют из таблиц В.1 приложения В настоящего пособия.

Для комбинации нагружения III  $x_1 = 9,6$  м и  $y_1 = 6,28$  м, а  $x_3 = 21,6$  м и  $y_3 = 10,2335$  м.

Для комбинации нагружения IV  $x_2 = 15,12$  м;  $y_2 = 8,55$  м. Значение  $M_2 = M_{E,dIV,max} = 960,1$  кН·м, а  $0,8 M_{E,dIV,max} = 0,8 \cdot 960,1 = 768,08$  кН·м. Координаты сечений 1 и 3 –  $x_1 = 9,6$  м и  $y_1 = 6,28$  м, а  $x_3 = 21,0$  м и  $y_3 = 10,12$  м.

Поскольку координаты сечений 1 и 3 для комбинаций нагружения III и IV практически совпадают, то расчетную длину  $l_{curve,d}$  криволинейного участка определяют только для комбинации нагружения IV, используя выражение для длины дуги сектора.

$$l_{curve,dIV} = \frac{\pi \cdot R \cdot (\alpha_1 - \alpha_3)}{180^\circ} = \frac{3,14 \cdot 46,41 \cdot (26^\circ - 11^\circ 12')}{180^\circ} = 11,66 \text{ м.}$$

Значение коэффициента  $k_{vol}$ , учитывающего отношение базового (стандартного)  $V_0$  объема к  $V_{arch}$  объему древесины арки на участке длиной  $l_{curve} = 11,98$  м, в сечениях которого возникают радиальные напряжения  $\sigma_{t,90,d}$ , возникающие от действия положительного изгибающего момента  $M_{E,dV,maxIII} = 960,1$  кН, определяют из выражения

$$k_{vol} = \left( \frac{V_0}{V_{arch}} \right)^{0,2} = \left( \frac{V_0}{h \cdot b \cdot l_{curve}} \right)^{0,2} = \left( \frac{0,01}{1,2 \cdot 0,25 \cdot 11,66} \right)^{0,2} = 0,31.$$

Значение коэффициента  $k_{dis}$ , учитывающего распределение напряжений в объеме древесины криволинейного участка длиной  $l_{curve,dIV}$  согласно [11], принимают равным 1,4.

Значение коэффициента  $k_{curve,t}$  рассчитывают по формуле (2.39), т. е.

$$k_{curve,t} = \frac{h}{4 \cdot (R + 0,5 \cdot h)} = \frac{1,2}{4 \cdot (46,41 + 0,5 \cdot 1,2)} = 0,006,$$

где  $h$  – высота поперечного сечения арки, м;

$R$  – радиус кривизны дуги арки, м.



Тогда расчетное значение напряжения, вызывающего растяжение древесины поперек волокон в сечениях арки на участке  $l_{curve,dIV}$  от действия  $M_{E,dIV,max}$ , будет составлять

$$\sigma_{t,90,dIV} = k_{curve,t} \cdot \frac{6 \cdot M_{E,dIV,max}}{b \cdot h^2} = 0,006 \cdot \frac{6 \cdot 960,1 \cdot 10^6}{250 \cdot 1200^2} = 0,095 \text{ МПа.}$$

Расчетное значение прочности  $f_{t,90,d}$  древесины арки для комбинации нагружения IV определяют по формуле

$$f_{t,90,dIV} = \frac{k_{modIV} \cdot f_{t,90,g,k} \cdot k_{sys}}{\gamma_M} = \frac{0,8 \cdot 0,5 \cdot 1}{1,25} = 0,32 \text{ МПа.}$$

Проверяют соблюдение условия (2.37) настоящего пособия при действии напряжения  $\sigma_{t,90,d}$ .

$$\frac{\sigma_{t,90,dV}}{k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,dV}} = \frac{0,095}{1,4 \cdot 0,31 \cdot 0,32} = 0,68 < 1 - \text{прочность древесины от действия растягивающих поперек волокон напряжений } \sigma_{t,90,dV} \text{ для комбинации нагружения IV}$$

обеспечена.

### 3.7.2 Проверка устойчивости плоской формы деформирования арки

Проверку устойчивости плоской формы деформирования арки (устойчивости из ее плоскости), выполняют в соответствии с рекомендациями, приведенными в п. 2.3.22 настоящего пособия.

Расчетная длина участка  $l_{0,z} = 3$  м (расстояние между точками крепления крайних продольных ребер плиты покрытия по длине арки).

Согласно формулам (5.34), (7.56) и (7.24) [11] определяют расчетные значения прочности древесины арки при сжатии и изгибе:

– для комбинации нагружения (сочетания) I

$$f_{c,0,dI} = \frac{k_{mod,I} \cdot f_{c,0,g,k} \cdot k_{sys}}{\gamma_M} = \frac{0,6 \cdot 32 \cdot 1}{1,25} = 15,36 \text{ МПа,}$$

$$f_{m,y,dI} = \frac{k_{mod,I} \cdot f_{m,g,k} \cdot k_h \cdot k_{sys}}{\gamma_M} = \frac{0,6 \cdot 32 \cdot 1 \cdot 1}{1,25} = 15,3 \text{ МПа,}$$

Поскольку  $h > 600$  мм, то  $k_h = 1$ ;

– для комбинаций нагружения (сочетаний) II, III и IV

$$f_{c,0,dII} = f_{c,0,dIII} = f_{c,0,dIV} = \frac{k_{mod,II} \cdot f_{c,0,g,k} \cdot k_{sys}}{\gamma_M} = \frac{0,8 \cdot 32 \cdot 1}{1,25} = 20,48 \text{ МПа,}$$

$$f_{m,y,dII} = f_{m,y,dIII} = f_{m,y,dIV} = \frac{k_{mod,II} \cdot f_{m,g,k} \cdot k_h \cdot k_{sys}}{\gamma_M} = \frac{0,8 \cdot 32 \cdot 1 \cdot 1}{1,25} = 20,48 \text{ МПа.}$$

При выполнении проверки устойчивости арки из ее плоскости предварительно определяют расчетные значения нормальных  $\sigma_{c,0,d}$  и изгибающих  $\sigma_{m,y,d}$  напряжений в расчетном сечении арки с максимальным изгибающим моментом. Значения  $\sigma_{c,0,d}$  и  $\sigma_{m,y,d}$  определяют по формулам (2.30) и (2.31) настоящего пособия для комбинаций нагружений (сочетаний усилий) III, IV.

Для комбинации (сочетания) нагружения III (таблица 3.5)  $M_{E,dIII,y,max} = 618,8$  кН м;  $N_{E,dIII} = -696,3$  кН, тогда

$$\sigma_{c,0,dIII} = \frac{N_{E,dIII}}{A} = \frac{696,3 \cdot 10^3}{1200 \cdot 250} = 2,32 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{m,y,dIII} = \frac{M_{E,dIII,y,max}}{I_y} \cdot \frac{h}{2} = \frac{618,8 \cdot 10^6}{36 \cdot 10^9} \cdot \frac{1200}{2} = 10,32 \text{ МПа.}$$

Для комбинации (сочетания) нагружения IV (таблица 3.6)  $M_{E,dIV,y,max} = 960,1$  кН м;  $N_{E,dIV} = -577,74$  кН, тогда

$$\sigma_{c,0,dIV} = \frac{N_{E,dIV}}{A} = \frac{577,74 \cdot 10^3}{1200 \cdot 250} = 1,93 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{m,y,dIV} = \frac{M_{E,dIV,y,max}}{I_y} \cdot \frac{h}{2} = \frac{960,1 \cdot 10^6}{36 \cdot 10^9} \cdot \frac{1200}{2} = 15,97 \text{ МПа}.$$

Величину критического  $\sigma_{crit,z}$  напряжения определяют по формуле (2.52) настоящего пособия.

$$\sigma_{crit,z} = \frac{\pi^2 \cdot E_{0,05} \cdot I_z}{A \cdot I_{0,z}^2} = \frac{3,14^2 \cdot 11800 \cdot 15,625 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^5 \cdot 3000^2} = 67,4 \text{ МПа}.$$

Величину приведенной  $\lambda_{rel,z}$  гибкости рассчитывают, используя формулу (2.53) настоящего пособия

$$\lambda_{rel,z} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{crit,z}}} = \sqrt{\frac{32}{67,4}} = 0,69.$$

Значения коэффициентов  $k_z$  и  $k_{c,z}$  рассчитывают по формулам (2.54) и (2.55) настоящего пособия.

$$k_z = 0,5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,1 \cdot (0,69 - 0,3) + 0,69^2] = 0,76,$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{0,76 + \sqrt{0,76^2 - 0,69^2}} = 0,93.$$

Значение критического напряжения от поворота (кручения) поперечного сечения относительно оси z на участке  $l_{0,z}$  с постоянным моментом определяют по формуле (2.56) с учетом рекомендаций п.2.3.22 настоящего пособия.

Предварительно определяют значение момента инерции поперечного сечения арки при кручении, используя выражение

$$I_{tor} = k \cdot h \cdot b^3 = 0,289 \cdot 1200 \cdot 250^3 = 5,41875 \cdot 10^9 \text{ мм}^4,$$

здесь k – коэффициент, значение которого принимают из таблицы 2.1 настоящего пособия при  $h/b = 1200/250 = 4,8$ .

$$\sigma_{m,crit} = \frac{\pi \cdot \sqrt{E_{0,05} \cdot I_z \cdot G_{0,05} \cdot I_{tor}}}{I_{0,z} \cdot I_y \cdot \frac{2}{h}} = \frac{3,14 \cdot \sqrt{11800 \cdot 15,625 \cdot 10^8 \cdot 540 \cdot 5,41875 \cdot 10^9}}{3000 \cdot 36 \cdot 10^9 \cdot \frac{2}{1200}} = 128,1 \text{ МПа}.$$

Приведенную  $\lambda_{rel,m}$  гибкость от изгиба, вызывающего кручение поперечного сечения, рассчитывают по формуле (7.35) [11].

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,0,k}}{\sigma_{crit,z}}} = \sqrt{\frac{32}{128,1}} = 0,5.$$

Поскольку  $\lambda_{rel,m} < 0,75$ , то в соответствии с п. 7.3.6 [11] значение коэффициента  $k_{crit} = 1$ .

Для корректировки расчетных значений изгибающих  $\sigma_{m,y,d}$  напряжений, возникающих на кромках расчетных сечений криволинейных участков арки, определяют значение коэффициента  $k_l$ , используя формулу (2.51) настоящего пособия.

$$k_r = 1 + 0,35 \cdot \frac{h}{R} + 0,6 \cdot \left( \frac{h}{R} \right)^2 = 1 + 0,35 \cdot \frac{1,2}{46,41} + 0,6 \cdot \left( \frac{1,2}{46,41} \right)^2 = 1,01.$$

Проверку устойчивости плоской формы деформирования арки (устойчивости из плоскости) на участке длиной  $l = 3$  м выполняют для двух комбинаций (сочетаний) нагружения (III, IV), руководствуясь правилами раздела 7.5 [11]. При выполнении данной проверки должны выполняться условия:

$$\left( \frac{\sigma_{m,y,d} \cdot k_l}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1,$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d} \cdot k_l}{f_{m,y,d}} \leq 1.$$

Тогда:

– для комбинации (сочетания) III нагружения

$$\left( \frac{\sigma_{m,y,dIII} \cdot k_l}{k_{crit} \cdot f_{m,y,dIII}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,dIII}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,dIII}} = \left( \frac{10,32 \cdot 1,01}{1 \cdot 20,48} \right)^2 + \frac{2,32}{0,93 \cdot 20,48} = 0,38 < 1 \text{ – условие выпол-}$$

нено,

$$\frac{\sigma_{c,0,dIII}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,dIII}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,dIII} \cdot k_l}{f_{m,dIII}} = \frac{2,32}{0,93 \cdot 20,48} + 0,7 \cdot \frac{10,32 \cdot 1,01}{20,48} = 0,48 < 1 \text{ – условие выпол-}$$

нено;

– для комбинации (сочетания) IV нагружения

$$\left( \frac{\sigma_{m,y,dIV} \cdot k_l}{k_{crit} \cdot f_{m,y,dIV}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,dIV}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,dIV}} = \left( \frac{15,97 \cdot 1,01}{1 \cdot 20,48} \right)^2 + \frac{1,93}{0,93 \cdot 20,48} = 0,72 < 1 \text{ – условие выпол-}$$

нено,

$$\frac{\sigma_{c,0,dIV}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,dIV}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,dIV} \cdot k_l}{f_{m,dIV}} = \frac{1,93}{0,93 \cdot 20,48} + 0,7 \cdot \frac{15,97 \cdot 1,01}{20,48} = 0,65 < 1 \text{ – условие вы-}$$

полнено.

Таким образом, устойчивость арки из ее плоскости обеспечена.

### 3.7.3 Проверка устойчивости арки в плоскости ее изгиба

Проверку устойчивости арки в плоскости ее изгиба выполняют в соответствии с рекомендациями п. 2.3.21 настоящего пособия.

Проверку устойчивости арки в плоскости ее изгиба выполняют для двух комбинаций нагружения (сочетание III и IV) в сечении с максимальным значением изгибающего момента  $M_{E,d,y,max}$  и соответствующим продольным  $N_{E,d}$  усилием.

При выполнении данной проверки первоначально для каждого сочетания усилий определяют расчетные значения нормальных напряжений  $\sigma_{c,0,d}$  и  $\sigma_{m,y,d}$  в сечении с максимальным расчетным значением изгибающего  $M_{E,d,y,max}$  и соответствующим значением продольного усилия  $N_{E,d}$ , используя формулы (2.43) и (2.44) настоящего пособия.

Для комбинации (сочетания) нагружения III (равномерно распределённая постоянная нагрузка по всему пролету + снеговая несимметричная нагрузка), как было определено выше, расчетные значения напряжений  $\sigma_{c,0,dIII} = 2,32$  МПа,  $\sigma_{m,y,dIII} = 10,32$  МПа.

Для комбинации (сочетания) нагружения IV (равномерно распределённая постоянная нагрузка по всему пролету + снеговая несимметричная нагрузка, распределённая по треугольнику на половине пролета), как было определено выше, расчетные значения напряжений  $\sigma_{c,0,dIV} = 1,93$  МПа,  $\sigma_{m,y,dIV} = 15,97$  МПа.

Расчетную  $l_{d,0,y}$  длину полуарки определяют по формуле (2.47) настоящего пособия

$$l_{d,0,y} = 1,25 \cdot \frac{S}{2} = 1,25 \cdot \frac{65,2}{2} = 40,75 \text{ м.}$$

Для прямоугольного сечения арки величину гибкости  $\lambda_y$  определяют по формуле (2.46) настоящего пособия.

$$\lambda_y = \frac{l_{d,0,y}}{\frac{h}{\sqrt{12}}} = \frac{40,75}{\frac{1,2}{\sqrt{12}}} = 117,5.$$

Значение приведенной гибкости  $\lambda_{rel,y}$  рассчитывают по формуле (2.45) настоящего пособия.

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,g,k}}{E_{0,g,0,05}}} = \frac{117,5}{3,14} \cdot \sqrt{\frac{32}{11800}} = 1,94.$$

Значения коэффициентов  $k_{c,y}$ ,  $k_y$  и  $k_l$  рассчитывают по формулам (2.49), (2.50) и (2.51).

$$k_l = 1 + 0,35 \cdot \frac{h}{R} + 0,6 \cdot \left(\frac{h}{R}\right)^2 = 1 + 0,35 \cdot \frac{1,2}{46,41} + 0,6 \cdot \left(\frac{1,2}{46,41}\right)^2 = 1,01,$$

$$k_y = 0,5 \cdot \left[1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2\right] = 0,5 \cdot \left[1 + 0,1 \cdot (1,94 - 0,3) + 1,94^2\right] = 2,46,$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{2,46 + \sqrt{2,46^2 - 1,94^2}} = 0,25.$$

Поскольку  $\lambda_{rel,y} > 0,3$ , то для всех комбинаций нагружения при проверке устойчивости арки в ее плоскости должно соблюдаться условие

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d} \cdot k_l}{f_{m,y,d}} \leq 1.$$

Тогда:

– для комбинации (сочетания) нагружения III

$$\frac{\sigma_{c,0,dIII}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,dIII}} + \frac{\sigma_{m,y,dIII} \cdot k_l}{f_{m,y,dIII}} = \frac{2,32}{0,25 \cdot 20,48} + \frac{10,32 \cdot 1,01}{20,48} = 0,96 < 1, \text{ условие выполнено.}$$

– для комбинации (сочетания) нагружения IV

$$\frac{\sigma_{c,0,dIV}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,dIV}} + \frac{\sigma_{m,y,dIV} \cdot k_l}{f_{m,y,dIV}} = \frac{1,93}{0,25 \cdot 20,48} + \frac{15,97 \cdot 1,01}{20,48} = 1,16 > 1, \text{ условие не выполнено.}$$

Поскольку для комбинации (сочетания) нагружения IV несущая способность арки в плоскости ее изгиба не обеспечивается, увеличиваем высоту поперечного сечения на 120 мм, т. е. высота вновь принятого поперечного сечения арки  $h_1 = 1320$  мм. Тогда расчетные значения нормальных  $\sigma_{c1,0,d}$  и изгибающих  $\sigma_{m1,y,d}$  напряжений в расчетном сечении арки для комбинации (сочетания) нагружения IV будут составлять:

$$\sigma_{c1,0,dV} = \frac{N_{E,dIV}}{A_1} = \frac{577,74 \cdot 10^3}{250 \cdot 1320} = 1,75 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{m1,y,dIV} = \frac{6 \cdot M_{E,d,y,maxIV}}{b \cdot h_1^2} = \frac{6 \cdot 960,1 \cdot 10^6}{250 \cdot 1320^2} = 13,22 \text{ МПа.}$$

Для вновь принятого прямоугольного поперечного сечения арки  $b \times h_1 = 250 \times 1320$  мм определяют значения следующих характеристик и коэффициентов:

$$\lambda_{y1} = \frac{l_{d,0,y}}{h_1} = \frac{40,75}{1,32} = 107,$$

$$\lambda_{rel,y1} = \frac{\lambda_{y1}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,g,k}}{E_{0,g,0,05}}} = \frac{108,5}{3,14} \cdot \sqrt{\frac{32}{11800}} = 1,77.$$

$$k_{y1} = 1 + 0,35 \cdot \frac{h_1}{R} + 0,6 \cdot \left(\frac{h_1}{R}\right)^2 = 1 + 0,35 \cdot \frac{1,32}{46,41} + 0,6 \cdot \left(\frac{1,32}{46,41}\right)^2 = 1,01,$$

$$k_{y1} = 0,5 \cdot \left[1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y1} - 0,3) + \lambda_{rel,y1}^2\right] = 0,5 \cdot \left[1 + 0,1 \cdot (1,77 - 0,3) + 1,77^2\right] = 2,14,$$

$$k_{c,y1} = \frac{1}{k_{y1} + \sqrt{k_{y1}^2 - \lambda_{rel,y1}^2}} = \frac{1}{2,14 + \sqrt{2,14^2 - 1,77^2}} = 0,3.$$

Для комбинации нагружения V проверяют выполнение условия

$$\frac{\sigma_{c1,0,dIV}}{k_{c,y1} \cdot f_{c,0,dIV}} + \frac{\sigma_{m1,y,dIV} \cdot k_{l1}}{f_{m,y,dIV}} = \frac{1,75}{0,3 \cdot 20,48} + \frac{13,22 \cdot 1,01}{20,48} = 0,94 < 1, \quad - \text{условие выполнено.}$$

Устойчивость арки в плоскости ее кривизны обеспечена.

Поскольку высота поперечного сечения арки увеличилась ( $h_1 = 1320$  мм), а ширина ( $b = 250$  мм) не изменилась по отношению к первоначальной, возрастает вероятность потери устойчивости из плоскости арки из-за кручения. В связи с этим определим величину критического напряжения от изгиба поперечного сечения относительно оси z, используя формулу (2.56) настоящего пособия, а также значение приведенной  $\lambda_{rel,m1,z}$  гибкости.

$$\sigma_{m1,z,crit} = \frac{\pi \cdot \sqrt{E_{0,05} \cdot I_{z1} \cdot G_{0,05} \cdot I_{tor1}}}{I_{0,z} \cdot I_{y1} \cdot \frac{2}{h_1}} = \frac{3,14 \cdot \sqrt{11800 \cdot 1,71875 \cdot 10^9 \cdot 540 \cdot 6,022 \cdot 10^9}}{3000 \cdot 47,916 \cdot 10^9 \cdot \frac{2}{1320}} = 117 \text{ МПа.}$$

Значение приведенной  $\lambda_{rel,m1,z}$  гибкости поперечного сечения арки определяют, используя формулу (7.35) [11].

$$\lambda_{rel,m1,z} = \sqrt{\frac{f_{m,0,k}}{\sigma_{crit,m1,z}}} = \sqrt{\frac{32}{117}} = 0,52, \quad \text{что меньше } 0,75 \text{ и } k_{crit} = 1.$$

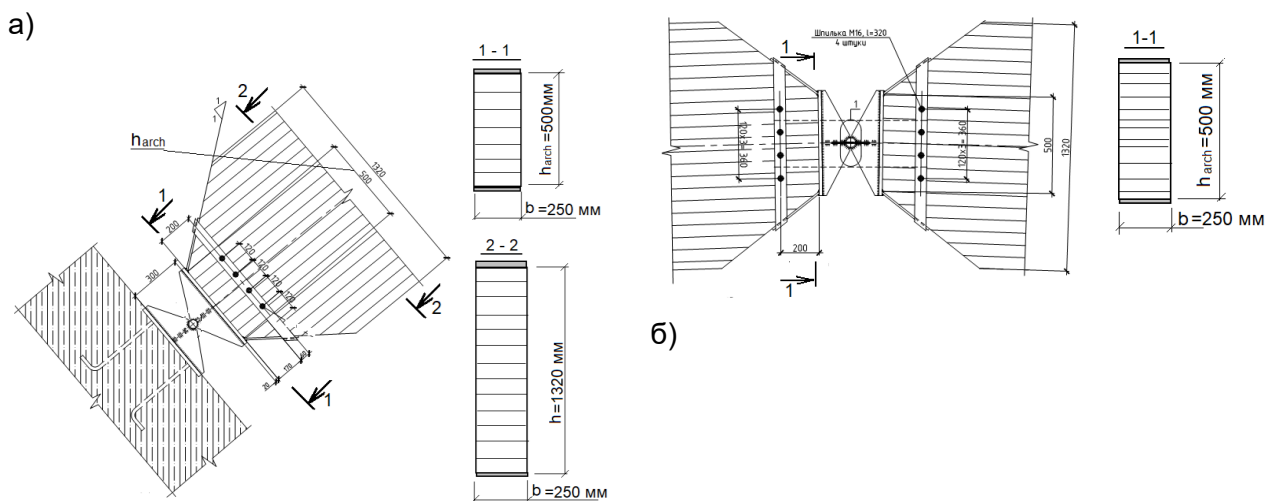
Поскольку расчетные значения  $\sigma_{c1,0,dIV}$  и  $\sigma_{m1,y,dIV}$  напряжений для вновь принятого сечения уменьшились, а значение коэффициента  $k_{crit}$  не изменилось, выполнение проверки устойчивости арки из ее плоскости не требуется.

В результате выполненных проверок, арка поперечным сечением  $b \times h_1 = 250 \times 1320$  мм удовлетворяет требованиям предельных состояний несущей способности.

### 3.8 Конструирование и расчет опорного и конькового узлов арки

#### 3.8.1 Проверка сопротивления опорных площадок под плитами башмаков опорных узлов при сжатии древесины вдоль волокон и сопротивления сдвигу в опорных сечениях

Опорные и коньковые узлы арок выполняем с использованием стальных башмаков (рис. 3.9). Высота опорных сечений полуарок  $h_{arch}$  (длина опорной пластины башмака) составляет 500 мм.



а) – опорный узел; б) – коньковый узел  
**Рисунок 3.9 – Конструктивные схемы узлов арки**

Выполним проверку сопротивлений опорных площадок при сжатии древесины вдоль волокон под опорными плитами башмаков и сдвигу в сечениях опорного и узла, используя формулы (2.28) и (2.29).

В результате статического расчета арки расчетные значения эффектов воздействий (сжимающих и сдвигающих усилий) в опорном узле А оказались равными:

- для комбинации (сочетания) нагружения I (постоянные нагрузки) –  $N_{c,E,dI} = -395,7$  кН;  $V_{E,dI} = -27,8$  кН (см. табл. 3.1);
- для комбинации (сочетания) нагружения II (постоянные нагрузки + снеговая равномерно распределенная нагрузка) –  $N_{c,E,dII} = -812,0$  кН;  $V_{E,dII} = -57,0$  кН (см. табл. 3.1);
- для комбинации (сочетания) нагружения III (постоянные нагрузки + снеговая распределенная по треугольникам нагрузка)  $N_{c,E,dIII} = -875,5$  кН (опора А);  $V_{E,dIII} = 70,95$  кН (опора В, см. табл. 3.3);
- для комбинации (сочетания) нагружения IV (постоянные нагрузки + снеговая нагрузка, распределенная по треугольнику на половине пролета)  $N_{c,E,dIV} = 761,78$  кН (опора А);  $V_{E,dIV} = 111,15$  кН (опора Б, см. табл. 3.4).

Для выполнения проверок предварительно определяют расчетные значения прочности  $f_{c,0,g,d}$  дощатоклееной древесины при сжатии и сдвиге  $f_{v,g,d}$  вдоль волокон для четырех сочетаний усилий, используя формулы (7.7) и (7.28) [11].

Тогда для комбинации (сочетания) нагружения I (постоянная нагрузка)

$$f_{c,0,g,dI} = \frac{k_{mod,I} \cdot f_{c,0,g,k} \cdot k_{sys}}{\gamma_M} = \frac{0,6 \cdot 32 \cdot 1}{1,25} = 15,36 \text{ МПа},$$

$$f_{v,g,dI} = \frac{k_{mod,I} \cdot f_{v,q,k} \cdot k_{sys}}{\gamma_M} = \frac{0,6 \cdot 3,5 \cdot 1}{1,25} = 1,68 \text{ МПа}.$$

Для комбинаций (сочетаний) нагружения II, III и IV (постоянная нагрузка + снеговая)

$$f_{c,0,g,dII} = f_{c,0,g,dIII} = f_{c,0,g,dIV} = \frac{k_{mod,II} \cdot f_{c,0,g,k} \cdot k_{sys}}{\gamma_M} = \frac{0,8 \cdot 32 \cdot 1}{1,25} = 20,48 \text{ МПа},$$

$$f_{v,g,dII} = f_{v,g,dIII} = f_{v,g,dIV} = \frac{k_{mod,III} \cdot f_{v,q,k} \cdot k_{sys}}{\gamma_M} = \frac{0,8 \cdot 3,5 \cdot 1}{1,25} = 2,24 \text{ МПа}.$$

При проверке опорных сечений сжатие древесины вдоль волокон должно соблюдаться условие (2.28). Расчетные значений  $N_{c,R,d}$  сопротивлений под опорными пластинами башмаков определяют для каждой комбинации нагружения.

Для комбинации (сочетания) нагружения I

$$N_{c,R,dI} = f_{c,0,gm,dI} \cdot h_{arch} \cdot b = 15,36 \cdot 500 \cdot 250 = 1920 \text{ кН} > N_{c,E,dI} = 395,7 \text{ кН} \text{ – условие (2.28)}$$

выполнено.

Для комбинации (сочетания) нагружения II

$$N_{c,R,dII} = N_{c,R,dIII} = f_{c,0,gm,dII} \cdot h_{arch} \cdot b = 20,48 \cdot 500 \cdot 250 = 2560 \text{ кН} > N_{c,E,dII} = 812,5 \text{ кН} \text{ – усло-}$$

вие (2.28) выполнено.

Для комбинации (сочетания) нагружения III

$$N_{c,R,dIII} = f_{c,0,gm,dIII} \cdot h_{arch} \cdot b = 20,48 \cdot 500 \cdot 250 = 2560 \text{ кН} > N_{c,E,dIII} = 875,5 \text{ кН} \text{ – условие}$$

(2.28) выполнено.

Для сочетания IV

$$N_{c,R,dIV} = f_{c,0,gm,dIV} \cdot h_{arch} \cdot b = 20,48 \cdot 500 \cdot 250 = 2560 \text{ кН} > N_{c,E,dIV} = 761,78 \text{ кН} \text{ – условие}$$

(2.28) выполнено.

При проверке опорных сечений сдвигу древесины вдоль волокон должно соблюдаться условие (2.29). Расчетные значения  $V_{R,d}$  сопротивлений в опорных сечениях арки определяют для каждой комбинации нагружения.

Для комбинации (сочетания) нагружения I

$$V_{R,dI} = V_{R,dI} = \frac{2}{3} \cdot f_{v,g,dI} \cdot h_{arch} \cdot b \cdot k_{cr} = \frac{2}{3} \cdot 1,68 \cdot 500 \cdot 250 \cdot 0,67 = 93,8 \text{ кН} > V_{E,dI} = 27,8 \text{ кН} .$$

Для комбинации (сочетания) нагружения II

$$V_{R,dII} = V_{R,dII} = \frac{2}{3} \cdot f_{v,g,dII} \cdot h_{arch} \cdot b \cdot k_{cr} = \frac{2}{3} \cdot 2,24 \cdot 500 \cdot 250 \cdot 0,67 = 125,07 \text{ кН} > V_{E,dII} = 57 \text{ кН} \text{ –}$$

условие (2.29) выполнено.

Для комбинации (сочетания) нагружения III

$$V_{R,dIII} = \frac{2}{3} \cdot f_{v,g,dIII} \cdot h_{arch} \cdot b \cdot k_{cr} = \frac{2}{3} \cdot 2,24 \cdot 500 \cdot 250 \cdot 0,67 = 125,07 \text{ кН} > V_{E,dIII} = 70,95 \text{ кН} \text{ –}$$

условие (2.29) выполнено.

Для комбинации (сочетания) нагружения IV

$$V_{R,dIV} = \frac{2}{3} \cdot f_{v,g,dIV} \cdot h_{arch} \cdot b \cdot k_{cr} = \frac{2}{3} \cdot 2,24 \cdot 500 \cdot 250 \cdot 0,67 = 125,07 \text{ кН} > V_{E,dIV} = 111,15 \text{ кН} \text{ –}$$

условие (2.29) выполнено.

Для всех комбинаций нагружений сопротивление опорных площадок древесины сжатию и сдвигу вдоль волокон в опорных сечениях обеспечиваются.

### 3.8.2 Конструирование и расчет стальных элементов опорного узла

Максимальное расчетное значение нормального усилия  $N_{E,d} = -875,5 \text{ кН}$  (сочетание III) возникает в опорном узле А (рис. 3.3) при комбинации нагружения III, максимальное усилие сдвига  $V_{E,dIV} = 111,15 \text{ кН}$  – в узле В при комбинации нагружения IV. Данные значения принимаются за расчетные усилия при выполнении проверок стальных элементов опорного узла арки.

Для опорного узла применяем прокат из стали С345 по [18].

Требуемый радиус шарнира определяем из условия прочности на смятие по формуле 210 [19]

$$r \geq \frac{N_{E,d}}{1,25 \cdot f_{lp} \cdot \gamma_c \cdot l} = \frac{875,5}{1,25 \cdot 220 \cdot 10^{-1} \cdot 20} = 1,59 \text{ см},$$

где  $f_{lp} = 220 \text{ МПа}$ , – расчетное значение прочности на местное смятие при плотном касании при  $f_{uk} = 450 \text{ МПа}$  (т. А.6 [19]);

$f_{uk}$  – характеристическое значение предела прочности для стали С345 при толщине проката от 40 до 60 мм принимают из таблицы А.3 [19];

$l$  – длина шарнира, которую принимаем равной 20 см;

$\gamma_c = 1,0$  – коэффициент условий работы, принимаемый из таблицы Б.1 [19].

Конструктивно принимаем шарнирный стержень из проката стального горячекатаного круглого  $\text{Ø}50^1$  по ГОСТ 2590 [20]. Для опирания стержня принимаем половину бесшовной горячедеформированной трубы  $\text{Ø}60 \times 5$  по ГОСТ 8732 [21] из стали С345.

Ширину и длину опорной части башмака принимаем такую же, как опорной части арки, т. е. 500 х 250 мм. Усилие от шарнира передается на башмак через сварной профиль из листового проката, имеющего два боковых и одно среднее ребро (рисунок 3.10).

Площадь смятия ребер под сварным профилем равна  $20t$  (разрез 1–1, рисунок 3.10). Тогда требуемая толщина ребер башмака должна удовлетворять условию

$$t \geq \frac{N_{E,d}}{f_{lp} \cdot \gamma_c} = \frac{875,5}{20 \cdot 220 \cdot 0,1 \cdot 1,0} = 1,99 \text{ см.}$$

Принимаем ребра толщиной  $t = 20 \text{ мм}$ .

В пределах башмака оголовок работает как плита, защемленная по трем сторонам и одной свободной короткой стороной, с размерами в плане 160 х 242 мм (участок 1 на разрезе 2–2, рисунок 3.10). Изгибающий момент на участке 1

$$M_1 = \alpha \cdot q \cdot a^2 = 0,128 \cdot 0,66 \cdot 16^2 = 21,63 \text{ кН} \cdot \text{см},$$

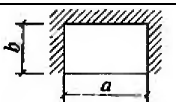
где  $a = 16 \text{ см}$  – длина свободного края участка 1;

$\alpha = 0,128$  – коэффициент, зависящий от соотношения сторон участка

$$\frac{b}{a} = \frac{242}{160} = 1,51 \text{ (таблица 3.5);}$$

$$q = \frac{N_{Ed}}{A_c} = \frac{825,5}{50 \cdot 25} = 0,660 \text{ кН / см}^2.$$

**Таблица 3.5 – Коэффициенты  $\alpha$  для расчета плит, опертых по трем сторонам**

Расчетная схема	Значения $\alpha$ при отношении $b/a$ , равном											
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	> 2,0
	0,06	0,074	0,088	0,097	0,107	0,112	0,12	0,126	0,129	0,131	0,132	0,133

Для участка, опирающегося на три канта (на три стороны), значение  $\alpha$  в запас прочности при  $b/a < 0,5$  находят как для консоли длиной  $b$ . Изгибающий момент на участке  $M = qb^2/2$ .

Изгибающий момент на консольном участке 2 (рис. 3.10) при вылете консоли  $a = 2,5 \text{ см}$

$$M_2 = \frac{q \cdot a^2}{2} = \frac{0,66 \cdot 2,5^2}{2} = 2,06 \text{ кН} \cdot \text{см}.$$

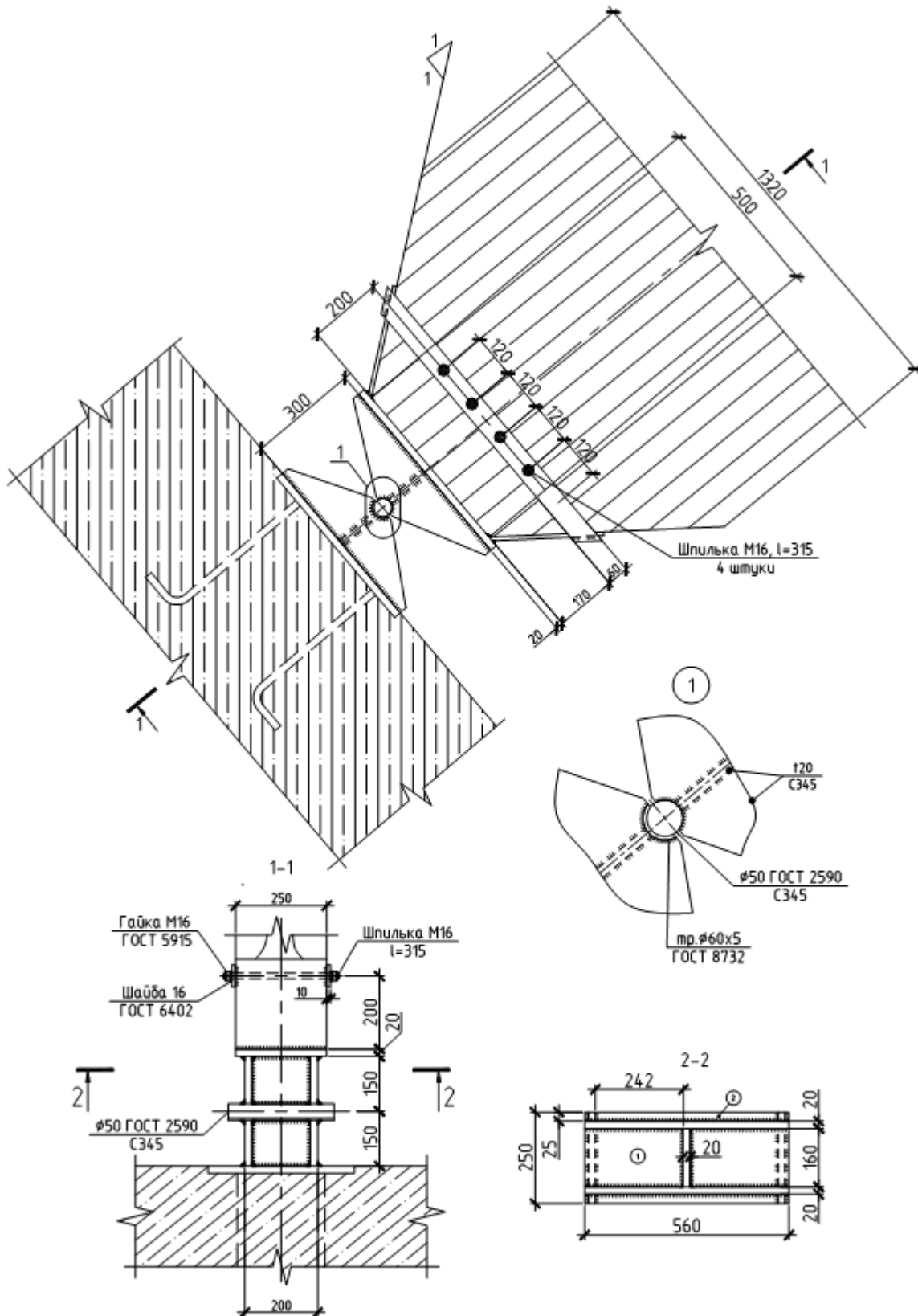
Для определения толщины плиты за расчетное значение изгибающего момента принимаем  $M_{\max} = M_1 = 19,58 \text{ кН} \cdot \text{см}$ . Тогда требуемая толщина плиты из стали С345 при  $f_{yd} = 320 \text{ МПа}$  будет составлять

<sup>1</sup> Для арок пролетом до 40 м рекомендуемый минимальный диаметр шарнирного стержня следует принимать 40 мм. При пролетах арок более 40 м минимальный диаметр шарнирного стержня 50 мм.



$$t_{pl} = \sqrt{\frac{6 \cdot M_{\max}}{f_{yd} \cdot \gamma_c}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 21,63}{320 \cdot 10^{-1} \cdot 1,2}} = 1,83 \text{ см.}$$

Толщину плиты, изготавливаемой из стального листа, принимаем равной 20 мм.



**Рисунок 3.10 – Конструктивное решение опорного узла арки**

### 3.8.3 Проверка сопротивления опорных площадок под плитами башмаков коньковых узлов при сжатии древесины вдоль волокон и сопротивления сдвигу в опорных сечениях

Поскольку конструкция конькового узла и длина опорных площадок аналогичны опорному узлу, а расчетные значения усилий меньше, чем в опорном узле (см. табл. 3.3 и 3.4), проверку сопротивления опорных площадок при сжатии древесины вдоль волокон и сопротивления древесины сдвигу в поперечном сечении не производим.

### 3.8.4 Конструирование и расчет стальных элементов конькового узла

Расчетное значение продольного усилия  $N_{E,dIII} = -660,9$  кН (см. табл. В.1 приложения В, сочетание III).

Т. к. максимальное расчетное значение продольного усилия в коньке  $N_{E,dIII} = -660,9$  кН меньше максимального расчетного значения продольного усилия, действующего в опорном узле  $N_{E,dIII} = -875,5$  кН, в целях унификации ширину и длину опорных площадок арок в коньке принимаем одинаковыми, т. е.  $b \times h_{\text{arch}} = 250 \times 500$  мм.

Шарнирный стержень также принимаем, как в опорном узле: из проката стального горячекатаного круглого  $\varnothing 50$  по ГОСТ 2590 [20]. Для опирания стержня принимаем половинку бесшовной горячедеформированной трубы  $\varnothing 60 \times 5$  по ГОСТ 8732 [21] из стали С345 (рисунок 3.11).

Площадь смятия ребер под сварным профилем равна  $19,2t$  (разрез 2–2, рисунок 3.11). Тогда требуемая толщина ребер башмака должна удовлетворять условию

$$t \geq \frac{N_{E,d}}{f_{lp} \cdot \gamma_c} = \frac{660,9}{19,2 \cdot 220 \cdot 0,1 \cdot 1,0} = 1,56 \text{ см.}$$

Принимаем ребра толщиной 16 мм.

В пределах башмака оголовок работает как плита, защемленная с трех сторон, со свободной одной короткой стороной, с размерами в плане 160 х 242 мм (участок 1 на разрезе 2–2, рисунок 3.11). Изгибающий момент на участке 1

$$M_1 = \alpha \cdot q \cdot a^2 = 0,128 \cdot 0,529 \cdot 16^2 = 17,33 \text{ кН} \cdot \text{см},$$

где  $a = 16$  см – длина свободного края участка 1;

$\alpha = 0,128$  – коэффициент, зависящий от соотношения сторон участка;

$\frac{b}{a} = \frac{242}{160} = 1,51$  (таблица 3.5);

$$q = \frac{N_{Ed}}{A_c} = \frac{660,9}{50 \cdot 25} = 0,529 \text{ кН} / \text{см}^2.$$

Принимаем для расчета  $M_{\text{max}} = M_1 = 17,33 \text{ кН} \cdot \text{см}$ . Требуемая толщина плиты из стали С345 при  $f_{yd} = 320$  МПа

$$t_{pl} = \sqrt{\frac{6 \cdot M_{\text{max}}}{f_{yd} \cdot \gamma_c}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 17,33}{320 \cdot 10^{-1} \cdot 1,2}} = 1,65 \text{ см.}$$

Принимаем плиту толщиной 18 мм.

Т.к. в коньковом узле отсутствует растягивающее усилие, по конструктивным требованиям принимаем накладку Н1 толщиной 6 мм.

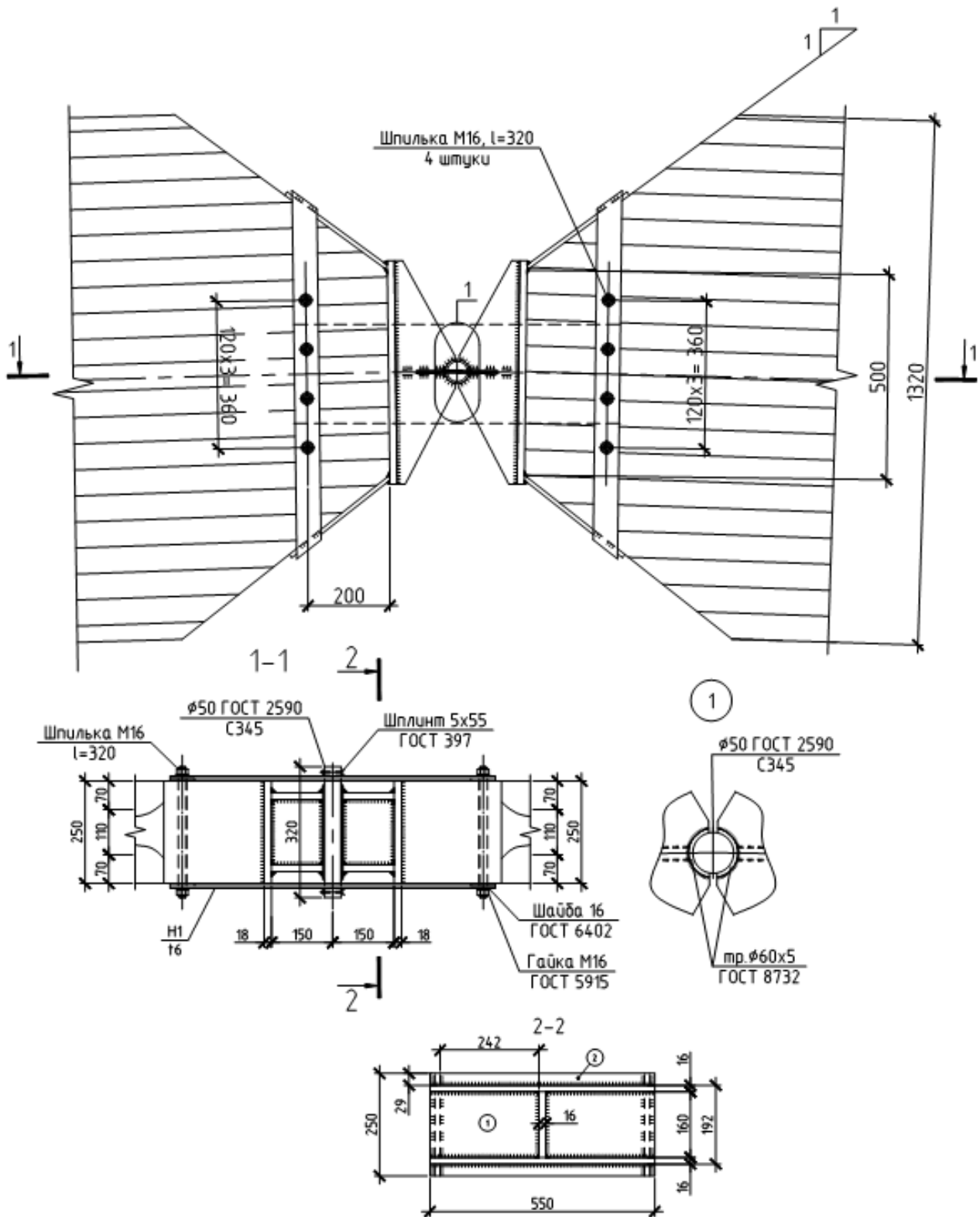


Рисунок 3.11 – Конструктивное решение конькового узла арки

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
(рекомендуемое)

Значения частных коэффициентов  $\gamma_M$  и  $k_{mod}$

**Таблица А.1 – Значения частного коэффициента свойств материалов,  $\gamma_M$  [11]**

Постоянные расчетные ситуации	$\gamma_M$
Пиломатериалы по СТБ EN 14081-1	1,3
Клееная древесина по СТБ EN 14080	1,25
LVL и фанера по СТБ EN 14374, СТБ EN 14279 и СТБ EN 636	1,2

**Таблица А.2 – Значения коэффициента модификации,  $k_{mod}$  [11]**

Материал	Класс эксплуатации	Класс длительности нагрузки				
		постоянная	длительная	среднесрочная	кратковременная	мгновенная
Пиломатериалы по СТБ EN 14081-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Клееная древесина по СТБ EN 14080	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Древесина из клееного шпона (LVL)	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Фанера по СТБ EN 636	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**  
(рекомендуемое)

Некоторые характеристики свойств древесины и материалов на ее основе

**Таблица Б.1 – Прочностные и упругие характеристики пиломатериалов, их плотность и объемный вес [23]**

Наименование показателя	Значение показателя для																	
	древесины хвойных пород класса												древесины лиственных пород класса					
	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D30	D35	D40	D50	D60	D70
<b>Показатели прочности, Н/мм<sup>2</sup></b>																		
Изгиб $f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	30	35	40	50	60	70
Растяжение вдоль волокон $f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	18	21	24	30	36	42
Растяжение поперек волокон $f_{t,9,0,k}$	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,9
Сжатие вдоль волокон $f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	23	25	26	29	32	34
Сжатие поперек волокон $f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5
Сдвиг $f_{v,k}$	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,8	3,8	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0
<b>Упругие характеристики, кН/мм<sup>2</sup></b>																		
Среднее значение модуля упругости вдоль волокон $E_{0,mean}$	7	8	9	9,5	10	11	11	12	13	14	15	16	10	10	11	14	17	20
5 %-ный квантиль модуля упругости вдоль волокон $E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	8,0	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8
Среднее значение модуля упругости поперек волокон $E_{90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33
Среднее значение модуля сдвига $G_{mean}$	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25
<b>Показатель плотности, кг/м<sup>3</sup></b>																		
Плотность $\rho_k$	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	530	560	590	650	700	900
Среднее значение плотности, $\rho_{mean}$	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	640	670	700	780	840	1080
<b>Объемный вес, кН/м<sup>3</sup></b>																		
Объемный вес $\gamma_k$	3,5	3,7	3,8	3,9	4,1	4,2	4,5	4,6	4,8	5,0	5,2	5,5	6,4	6,7	7,0	7,8	8,4	10,8
<b>Примечания</b>																		
1 Табличные значения распространяются на древесину с влажностью при температуре 20 °С и относительной влажностью воздуха 65 %.																		
2 Характеристические значения модуля сдвига $G_{0,05} = 0,8G_{mean}$ .																		

**Таблица Б.2 – Прочностные и упругие характеристики однородной клееной древесины из хвойных пиломатериалов, ее плотность и объемный вес по [24]**

Характеристики, Н/мм <sup>2</sup>	Обозначение	Классы прочности однородной клееной древесины						
		GL20h	GL22h	GL24h	GL 26h	GL 28h	GL 30h	GL 32h
Изгиб	$f_{m.g.k}$	20	22	24	26	28	30	32
Растяжение	$f_{t.0.g.k}$	16	17,6	19,2	20,8	22,3	24	25,6
	$f_{t.90.g.k}$	0,5						
Сжатие	$f_{c.0.g.k}$	20	22	24	26	28	30	32
	$f_{c.90.g.k}$	2,5						
Сдвиг	$f_{v.g.k}$	3,5						
Сдвиг при кручении	$f_{r.g.k}$	1,2						
Модуль упругости	$E_{0.g.mean}$	8400	10500	11500	12100	12600	13600	14200
	$E_{0.g.0.05}$	7000	8800	9600	10100	10500	11300	11800
	$E_{90.g.mean}$	300						
	$E_{90.g.0.05}$	250						
Модуль сдвига	$G_{g.mean}$	650						
	$G_{g.0.05}$	540						
Модуль сдвига при кручении	$G_{r.g.mean}$	65						
	$G_{r.g.0.05}$	54						
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{g.k}$	340	370	385	405	425	430	440
	$\rho_{g.mean}$	370	410	420	445	460	480	490
Объемный вес, кН/м <sup>3</sup>	$\gamma_k$	3,4	3,7	3,8	4,0	4,2	4,3	4,4

**Таблица Б.3 – Прочностные и упругие характеристики комбинированной клееной древесины из хвойных пиломатериалов, ее плотность и объемный вес по [24]**

Характеристики, Н/мм <sup>2</sup>	Обозначение	Классы прочности комбинированной клееной древесины						
		GL 20c	GL 22c	GL 24c	GL 26c	GL 28c	GL30c	GL 32c
Изгиб	$f_{m.g.k}$	20	22	24	26	28	30	32
Растяжение	$f_{t.0.g.k}$	15	16	17	19	19,5	19,5	19,5
	$f_{t.90.g.k}$	0,5						
Сжатие	$f_{c.0.g.k}$	18,5	20	21,5	23,5	24	24,5	24,5
	$f_{c.90.g.k}$	2,5						
Сдвиг	$f_{v.g.k}$	3,5						
Сдвиг при кручении	$f_{r.g.k}$	1,2						
Модуль упругости	$E_{0.g.mean}$	10400	10400	11000	12000	12500	13000	13500
	$E_{0.g.0.05}$	8600	8600	9100	10000	10400	10800	11200
	$E_{90.g.mean}$	300						
	$E_{90.g.0.05}$	250						
Модуль сдвига	$G_{g.mean}$	650						
	$G_{g.0.05}$	540						
Модуль сдвига при кручении	$G_{r.g.mean}$	65						
	$G_{r.g.0.05}$	54						
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{g.k}$	355	355	365	385	390	390	400
	$\rho_{g.mean}$	390	390	400	420	420	430	440
Объемный вес, кН/м <sup>3</sup>	$\gamma_k$	3,5	3,5	3,6	3,8	3,9	3,9	4,0

**Таблица Б.4 — Прочностные и упругие характеристики фанеры, ее плотность и объемный вес по [25]**

Наименование характеристики	Тип фанеры										
	F20/10 E40/20		F20/15 E30/15		F40/30 E60/40		F50/25 E70/25		F60/10 E90/10		
	Вдоль волокон	Поперек волокон	Вдоль волокон	Поперек волокон	Вдоль волокон	Поперек волокон	Вдоль волокон	Поперек волокон	Вдоль волокон	Поперек волокон	
<b>По пласти</b>											
Изгиб $f_{m,k}$ , Н/мм <sup>2</sup>	20	10	20	15	40	30	50	25	60	10	
Сжатие $f_{c90k}$ , Н/мм <sup>2</sup>	4				9			10			
Сдвиг $f_{v,k}$ , Н/мм <sup>2</sup>	0,9	0,6	1	0,7	2,2			2,5			
Модуль упругости $E_{mean}$ , Н/мм <sup>2</sup>	4000	2000	3000	2500	6000	4000	7000	2500	9000	1000	
Модуль сдвига $G_{mean}$ , Н/мм <sup>2</sup>	35	25	35	25	150			200			
<b>По грани</b>											
Изгиб $f_{m,k}$ , Н/мм <sup>2</sup>	9	7	8	7	29	31	36	24	36	24	
Растяжение $f_{t,k}$ , Н/мм <sup>2</sup>	9	7	8	7	29	31	36	24	36	24	
Сжатие $f_{c0k}$ , Н/мм <sup>2</sup>	15	10	13	13	21	22	36	17	26	18	
Сдвиг $f_{v,k}$ , Н/мм <sup>2</sup>	3,5		4,0		9,5			11,0			
Модуль упругости $E_{mean}$ , Н/мм <sup>2</sup>	4000	3000	4000	3000	4400	4700	5500	3650	5500	3700	
Модуль сдвига $G_{mean}$ , Н/мм <sup>2</sup>	350				600			700			
Плотность $\rho_k$ , кг/м <sup>3</sup>	350				600						
<b>Объемный вес, кН/м<sup>3</sup></b>											
Объемный вес $\gamma$	5,0				7,0						
<i>Примечание — Характеристические значения модуля упругости <math>E_{0,05}</math> и модуля сдвига <math>G_{0,05}</math> определяют: <math>E_{0,05} = 0,8E_{mean}</math>, <math>G_{0,05} = 0,8G_{mean}</math>.</i>											

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Статический расчет арки

**Таблица В.1 – Расчетные значения внутренних усилий в сечениях арки для комбинаций нагружения I ÷ IV**

Координаты сечений, м		Значения		Значения внутренних усилий в сечениях арки											
				для комбинации нагружения I (рис. 3.3а)			для комбинации нагружения II (рис. 3.3б)			для комбинации нагружения III (рис. 3.3в)			для комбинации нагружения IV (рис. 3.3г)		
X	Y	sin (α)	cos (α)	M, кН·м	V, кН	N, кН	M, кН·м	V, кН	N, кН	M, кН·м	V, кН	N, кН	M, кН·м	V, кН	N, кН
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0,000	0,000	0,6464	0,7630	0,000	-27,8	-395,7	0,000	-56,7	-812,5	0,000	10,9	-875,5	0,000	52,6	-761,8
0,600	0,500	0,6335	0,7737	-20,5	-24,8	-393,2	-41,8	-50,5	-807,3	11,1	17,4	-868,5	42,9	57,2	-754,1
1,200	0,983	0,6206	0,7842	-38,5	-21,9	-390,6	-78,4	-44,6	-802,0	26,8	23,3	-861,3	88,6	61,2	-746,3
1,800	1,450	0,6076	0,7942	-54,1	-19,2	-388,1	-110,3	-39,2	-796,7	46,6	28,6	-854,1	136,4	64,6	-738,5
2,400	1,901	0,5947	0,8039	-67,6	-16,7	-385,5	-137,8	-34,0	-791,5	69,9	33,3	-846,8	186,0	67,4	-730,6
3,000	2,338	0,5818	0,8133	-79,2	-14,4	-383,0	-161,2	-29,2	-786,4	96,2	37,4	-839,4	236,9	69,6	-722,6
3,600	2,760	0,5689	0,8224	-88,9	-12,2	-380,5	-181,0	-24,7	-781,2	124,9	40,9	-831,9	288,6	71,3	-714,7
4,200	3,168	0,5559	0,8312	-97,0	-10,1	-378,1	-197,4	-20,6	-776,2	155,7	43,8	-824,4	340,7	72,3	-706,7
4,800	3,562	0,5430	0,8397	-103,6	-8,2	-375,6	-210,8	-16,7	-771,1	187,9	46,1	-816,9	392,9	72,8	-698,7
5,400	3,944	0,5301	0,8480	-108,8	-6,5	-373,2	-221,3	-13,0	-766,2	221,3	47,8	-809,3	444,6	72,7	-690,8
6,000	4,313	0,5171	0,8559	-112,8	-4,8	-370,9	-229,3	-9,7	-761,3	255,5	49,0	-801,8	495,7	72,1	-682,9
6,600	4,669	0,5042	0,8636	-115,6	-3,3	-368,5	-234,9	-6,5	-756,5	289,9	49,6	-794,3	545,6	71,0	-675,1
7,200	5,013	0,4913	0,8710	-117,4	-1,9	-366,2	-238,4	-3,7	-751,8	324,3	49,7	-786,9	594,2	69,3	-667,3
7,800	5,346	0,4784	0,8782	-118,2	-0,6	-364,0	-240,1	-1,0	-747,1	358,3	49,3	-779,5	640,9	67,0	-659,7
8,400	5,667	0,4654	0,8851	-118,2	0,6	-361,8	-239,9	1,4	-742,6	391,5	48,3	-772,1	685,7	64,3	-652,1
9,000	5,977	0,4525	0,8918	-117,4	1,7	-359,6	-238,3	3,6	-738,1	423,6	46,8	-764,9	728,0	61,0	-644,6
9,600	6,276	0,4396	0,8982	-115,9	2,7	-357,5	-235,2	5,6	-733,7	454,3	44,7	-757,7	767,7	57,3	-637,3
10,200	6,564	0,4266	0,9044	-113,8	3,6	-355,4	-230,9	7,4	-729,4	483,3	42,2	-750,7	804,4	53,0	-630,1
10,800	6,842	0,4137	0,9104	-111,2	4,3	-353,4	-225,5	9,0	-725,3	510,2	39,2	-743,8	837,9	48,2	-623,0
11,400	7,110	0,4008	0,9162	-108,1	5,0	-351,4	-219,1	10,4	-721,2	534,8	35,6	-737,0	867,9	43,0	-616,1
12,000	7,367	0,3879	0,9217	-104,6	5,7	-349,5	-211,9	11,6	-717,3	556,8	31,6	-730,4	894,2	37,3	-609,4
12,600	7,615	0,3749	0,9271	-100,8	6,2	-347,6	-204,0	12,7	-713,4	575,8	27,1	-723,9	916,4	31,1	-602,9
13,200	7,853	0,3620	0,9322	-96,6	6,7	-345,8	-195,5	13,7	-709,7	591,7	22,1	-717,6	934,3	24,4	-596,5
13,800	8,081	0,3491	0,9371	-92,2	7,0	-344,0	-186,4	14,4	-706,0	604,2	16,7	-711,5	947,7	17,3	-590,4
14,400	8,300	0,3361	0,9418	-87,6	7,4	-342,3	-177,0	15,1	-702,5	613,0	10,7	-705,6	956,3	9,7	-584,5
15,000	8,509	0,3232	0,9463	-82,9	7,6	-340,7	-167,3	15,6	-699,1	617,8	4,4	-700,0	960,0	1,7	-578,8
15,600	8,709	0,3103	0,9506	-78,0	7,8	-339,1	-157,3	15,9	-695,9	618,5	-2,1	-694,6	958,5	-6,4	-573,5
16,200	8,901	0,2974	0,9548	-73,1	7,9	-337,5	-147,2	16,1	-692,7	615,3	-8,2	-689,7	952,0	-14,2	-568,7
17,400	9,257	0,2715	0,9624	-63,1	8,0	-334,6	126,9	16,3	-686,8	597,7	-19,6	-681,2	924,8	-28,9	-560,4
18,000	9,422	0,2586	0,9660	-58,1	8,0	-333,3	-116,8	16,1	-684,0	583,9	-24,8	-677,6	904,7	-35,7	-556,9



Продолжение таблицы В.1

18,600	9,578	0,2456	0,9694	-53,3	7,8	-332,0	-106,9	15,9	-681,4	566,9	-29,7	-674,3	880,6	-42,2	-553,8
19,200	9,726	0,2327	0,9725	-48,5	7,7	-330,8	-97,1	15,6	-678,9	547,2	-34,2	-671,4	852,6	-48,3	-551,1
19,800	9,865	0,2198	0,9755	-43,8	7,5	-329,6	-87,6	15,2	-676,5	524,9	-38,3	-668,9	821,1	-54,0	-548,8
20,400	9,996	0,2069	0,9784	-39,2	7,3	-328,5	-78,4	14,8	-674,2	500,2	-42,0	-666,7	786,3	-59,3	-546,8
21,000	10,119	0,1939	0,9810	-34,9	7,0	-327,5	-69,5	14,2	-672,1	473,4	-45,4	-664,8	748,5	-64,2	-545,1
21,600	10,234	0,1810	0,9835	-30,7	6,7	-326,5	-61,0	13,6	-670,1	444,8	-48,3	-663,2	707,9	-68,7	-543,8
22,200	10,340	0,1681	0,9858	-26,7	6,4	-325,6	-53,0	12,9	-668,3	414,6	-50,8	-661,8	664,7	-72,8	-542,7
22,800	10,438	0,1551	0,9879	-22,9	6,0	-324,8	-45,4	12,1	-666,5	383,1	-52,9	-660,7	619,4	-76,4	-541,9
23,400	10,528	0,1422	0,9898	-19,4	5,6	-324,0	-38,3	11,3	-665,0	350,5	-54,5	-659,9	572,0	-79,6	-541,4
24,000	10,611	0,1293	0,9916	-16,2	5,2	-323,3	-31,7	10,4	-663,5	317,1	-55,7	-659,3	523,0	-82,3	-541,1
24,600	10,685	0,1164	0,9932	-13,2	4,7	-322,6	-25,7	9,5	-662,2	283,2	-56,4	-658,8	472,5	-84,6	-541,1
25,200	10,751	0,1034	0,9946	-10,5	4,2	-322,1	-20,3	8,5	-661,0	249,0	-56,7	-658,6	420,8	-86,4	-541,2
25,800	10,810	0,0905	0,9959	-8,0	3,8	-321,6	-15,5	7,5	-660,0	214,9	-56,5	-658,5	368,3	-87,7	-541,5
26,400	10,860	0,0776	0,9970	-5,9	3,3	-321,1	-11,3	6,4	-659,1	181,0	-55,8	-658,6	315,2	-88,6	-542,0
27,000	10,903	0,0646	0,9979	-4,1	2,7	-320,8	-7,8	5,4	-658,3	147,7	-54,7	-658,8	261,8	-89,0	-542,6
27,600	10,938	0,0517	0,9987	-2,7	2,2	-320,5	-4,9	4,3	-657,7	115,3	-53,1	-659,1	208,3	-88,8	-543,4
28,200	10,965	0,0388	0,9992	-1,5	1,7	-320,2	-2,6	3,2	-657,2	84,1	-51,0	-659,5	155,1	-88,2	-544,2
28,800	10,985	0,0259	0,9997	-0,7	1,1	-320,0	-1,1	2,0	-656,9	54,2	-48,4	-659,9	102,5	-87,1	-545,2
29,400	10,996	0,0129	0,9999	-0,2	0,6	-319,9	-0,2	0,9	-656,7	26,1	-45,3	-660,4	50,7	-85,5	-546,2
30,000	11,000	0,0000	1,0000	0,0	0,0	-319,9	0,0	-0,3	-656,6	0,0	-41,7	-660,9	0,0	-83,4	-547,2
30,600	10,996	-0,0129	0,9999	-0,2	-0,6	-319,9	-0,5	-1,4	-656,7	-23,9	-37,9	-661,5	-49,3	-81,1	-548,3
31,200	10,985	-0,0259	0,9997	-0,7	-1,1	-320,0	-1,7	-2,5	-656,9	-45,6	-34,4	-662,0	-97,2	-78,6	549,4
31,800	10,965	-0,0388	0,9992	-1,5	-1,7	-320,2	-3,5	-3,6	-657,2	-65,2	-31,2	-662,6	-143,6	-76,1	-550,6
32,400	10,938	-0,0517	0,9987	-2,7	-2,2	-320,5	-6,0	-4,8	-657,7	-83,0	-28,1	-663,3	-188,6	-73,7	-551,8
33,000	10,903	-0,0646	0,9979	-4,1	-2,7	-320,8	-9,2	-5,8	-658,3	99,1	-25,3	-664,0	-232,1	-71,2	-553,0
33,600	10,860	-0,0776	0,9970	-5,9	-3,3	-321,1	-13,1	-6,9	-659,1	-113,6	-22,8	-664,7	-274,2	-68,7	-554,2
34,200	10,810	-0,0905	0,9959	-8,0	-3,8	-321,6	-17,5	-7,9	-660,0	-126,6	-20,4	-665,5	-314,8	-66,2	-555,5
34,800	10,751	-0,1034	0,9946	-10,5	-4,2	-322,1	-22,6	-8,9	-661,1	-138,2	-18,3	-666,4	354,0	-63,6	-556,8
35,400	10,685	-0,1164	0,9932	-13,2	-4,7	-322,6	-28,3	-9,9	-662,2	-148,7	-16,4	-667,4	391,6	-61,1	-558,1
36,000	10,611	-0,1293	0,9916	-16,2	-5,2	-323,3	-34,6	-10,8	-663,6	-158,0	-14,7	-668,4	-427,7	-58,4	-559,5
36,600	10,528	-0,1422	0,9898	-19,4	-5,6	-324,0	-41,4	-11,7	-665,0	-166,5	-13,2	-669,6	-462,3	-55,8	-560,9
37,200	10,438	-0,1551	0,9879	-22,9	-6,0	-324,8	-48,8	-12,5	-666,6	-174,0	-11,9	-670,9	-495,3	-53,1	-562,3
37,800	10,340	-0,1681	0,9858	-26,7	-6,4	-325,6	-56,6	-13,3	-668,3	-180,9	-10,7	-672,3	-526,8	-50,3	-563,7
38,400	10,234	-0,1810	0,9835	-30,7	-6,7	-326,5	-64,9	-13,9	-670,2	-187,1	-9,8	-673,8	-556,6	-47,5	-565,2
39,000	10,119	-0,1939	0,9810	-34,9	-7,0	-327,5	-73,6	-14,6	-672,2	-192,9	-9,1	-675,5	-584,7	-44,7	-566,7
39,600	9,996	-0,2069	0,9784	-39,2	-7,3	-328,5	-82,7	-15,1	-674,3	-198,3	-8,5	-677,3	-611,2	-41,8	-568,2
40,200	9,865	-0,2198	0,9755	-43,8	-7,5	-329,6	-92,1	-15,6	-676,6	-203,4	-8,1	-679,3	-636,0	-38,9	-569,7
40,800	9,726	-0,2327	0,9725	-48,5	-7,7	-330,8	-101,8	-15,9	-678,9	-208,3	-7,9	-681,5	-659,0	-35,9	-571,3

Окончание таблицы В.1

41,400	9,578	-0,2456	0,9694	-53,3	-7,8	-332,0	-111,7	-16,2	-681,5	-213,1	-7,8	-683,8	-680,2	-32,8	-572,8
42,000	9,422	-0,2586	0,9660	-58,1	-7,9	-333,3	-121,9	-16,4	-684,1	-217,9	-7,8	-686,3	-699,6	-29,7	-574,4
42,600	9,257	-0,2715	0,9624	-63,1	-8,0	-334,6	-132,1	-16,5	-686,9	-222,9	-8,0	-689,0	-717,0	-26,5	-576,1
43,200	9,083	-0,2844	0,9587	-68,1	-8,0	-336,1	-142,4	-16,5	-689,8	-228,0	-8,4	-691,9	-732,6	-23,2	-577,7
43,800	8,901	-0,2974	0,9548	-73,1	-7,9	-337,5	-152,7	-16,3	-692,8	-233,4	-8,8	-695,0	-746,1	-19,9	-579,3
44,400	8,709	-0,3103	0,9506	-78,0	-7,8	-339,1	-162,9	-16,1	-695,9	-239,1	-9,4	-698,3	-757,6	-16,5	-581,0
45,000	8,509	-0,3232	0,9463	-82,9	-7,6	-340,7	-172,9	-15,7	-699,2	-245,2	-10,0	-701,9	-766,9	-13,0	-582,7
45,600	8,300	-0,3361	0,9418	-87,6	-7,4	-342,3	-182,7	-15,1	-702,6	-251,8	-10,6	-705,6	-774,0	-9,4	-584,4
46,200	8,081	-0,3491	0,9371	-92,2	-7,0	-344,0	-192,2	-14,5	-706,1	-258,7	-10,9	-709,4	-778,9	-5,8	-586,1
46,800	7,853	-0,3620	0,9322	-96,6	-6,7	-345,8	-201,2	-13,7	-709,7	-265,8	-10,9	-713,3	-781,4	-2,1	-587,8
47,400	7,615	-0,3749	0,9271	-100,8	-6,2	-347,6	-209,8	-12,7	-713,4	-272,7	-10,7	-717,3	-781,5	1,8	-589,6
48,000	7,367	-0,3879	0,9217	-104,6	-5,7	-349,5	-217,7	-11,6	-717,2	-279,5	-10,1	-721,3	-779,1	5,7	-591,3
48,600	7,110	-0,4008	0,9162	-108,1	-5,0	-351,4	-224,8	-10,3	-721,2	-285,9	-9,3	-725,5	-774,1	9,7	-593,1
49,200	6,842	-0,4137	0,9104	-111,2	-4,3	-353,4	-231,1	-8,9	-725,2	-291,6	-8,1	-729,7	-766,4	13,8	-594,8
49,800	6,564	-0,4266	0,9044	-113,8	-3,6	-355,4	-236,5	-7,2	-729,4	-296,5	-6,7	-733,9	-755,9	18,0	-596,5
50,400	6,276	-0,4396	0,8982	-115,9	-2,7	-357,5	-240,7	-5,4	-733,6	-300,4	-4,9	-738,3	-742,4	22,4	-598,3
51,000	5,977	-0,4525	0,8918	-117,4	-1,7	-359,6	-243,6	-3,4	-738,0	-303,1	-2,8	-742,6	-725,9	26,8	-600,0
51,600	5,667	-0,4654	0,8851	-118,2	-0,6	-361,8	-245,1	-1,1	-742,4	-304,2	-0,4	-747,0	-706,2	31,4	-601,8
52,200	5,346	-0,4784	0,8782	-118,2	0,6	-364,0	-245,1	1,3	-747,0	-303,6	2,3	-751,4	-683,3	36,1	-603,5
52,800	5,013	-0,4913	0,8710	-117,4	1,9	-366,2	-243,3	4,0	-751,6	-300,9	5,4	-755,8	-656,8	40,9	-605,2
53,400	4,669	-0,5042	0,8636	-115,6	3,3	-368,5	-239,5	6,9	-756,3	-296,1	8,8	-760,2	-626,8	45,9	-606,9
54,000	4,313	-0,5171	0,8559	-112,8	4,8	-370,9	-233,6	10,1	-761,1	-288,6	12,5	-764,6	-593,0	51,0	-608,5
54,600	3,944	-0,5301	0,8480	-108,8	6,5	-373,2	-225,3	13,5	-765,9	-278,4	16,7	-769,0	-555,2	56,3	-610,2
55,200	3,562	-0,5430	0,8397	-103,6	8,2	-375,6	-214,5	17,1	-770,8	-265,0	21,1	-773,4	-513,3	61,7	-611,8
55,800	3,168	-0,5559	0,8312	-97,0	10,1	-378,1	-200,8	21,1	-775,8	-248,1	26,0	-777,7	-467,0	67,2	-613,4
56,400	2,760	-0,5689	0,8224	-88,9	12,2	-380,5	-184,0	25,3	-780,9	-227,3	31,2	-782,0	-416,1	73,0	-614,9
57,000	2,338	-0,5818	0,8133	-79,2	14,4	-383,0	-163,8	29,8	-785,9	-202,4	36,8	-786,3	-360,5	78,8	-616,4
57,600	1,901	-0,5947	0,8039	-67,6	16,7	-385,5	-139,9	34,7	-791,1	-172,9	42,8	-790,4	-299,7	84,9	-617,9
58,200	1,450	-0,6076	0,7942	-54,1	19,2	-388,1	-111,9	39,8	-796,2	-138,3	49,2	-794,5	-233,6	91,2	-619,3
58,800	0,983	-0,6206	0,7842	-38,5	21,9	-390,6	-79,6	45,3	-801,4	-98,3	56,0	-798,5	-161,9	97,6	-620,6
59,400	0,500	-0,6335	0,7737	-20,5	24,8	-393,2	-42,4	51,2	-806,7	-52,4	63,3	-802,4	-84,1	104,3	-621,9
60,000	0,000	-0,6464	0,7630	0,0	27,8	-395,7	0,0	57,44	-811,9	0,0	71,0	-806,1	0,0	111,2	-623,1

## Список использованных источников

1. Найчук, А. Я. Деревянные клееные конструкции в спортивных зданиях и сооружениях Республики Беларусь / А. Я. Найчук // Збірник наукових праць українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського. – Київ, 2010. – Вип. 5. – С. 32–40.
2. Опорные и коньковые узлы деревянных клееных трехшарнирных арок: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / А. Я. Найчук; МВиССО УССР; КИСИ – Киев, 1985. – 24 с.
3. Найчук, А. Я. Оценка прочности узлов деревянных клееных трехшарнирных арок методами механики разрушения / А. Я. Найчук // Промышленное и гражданское строительство. – М., 2006. – № 6. – С. 34–35.
4. Найчук, А. Я. Опыт проектирования и строительства общественных зданий с применением деревянных клееных конструкций в Республике Беларусь / А. Я. Найчук, В. Н. Деркач // Строительство в прибрежных курортных регионах : материалы VI Международной научно-практической конференции. – Сочи, 2010. – С. 68–70.
5. Турковский, С. Б. Клееные деревянные конструкции с узлами на клеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК) / С. Б. Турковский, А. А. Погорельцев, И. П. Преображенская. – М. : РИФ Стройматериалы. – 2013 – 308 с
6. Найчук, А. Я. О несущей способности узлов деревянных клееных трехшарнирных арок / А. Я. Найчук // Изв. вузов. Лесной журнал. – 2006. – № 3. – С. 141–145.
7. Найчук, А. Я. Натурные испытания клеедеревянной арки волнообразного очертания пролетом 42 м с затяжкой / А. Я. Найчук, А. Н. Петрукович // Итоги строительной науки : материалы V Международной научно-технической конференции / Владимирский госуниверситет. – Владимир, 2007. – С. 17–23.
8. Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Температурные воздействия : СН 2.01.06-2019. – Введены 08.09.2020. – Минск : Минстройархитектуры – 2020. – 35 с.
9. Защита строительных конструкций от коррозии : СН 2.01.07-2020. – Введены 31.12.2020. – Минск : Минстройархитектуры. – 2020. – 69 с.
10. Основы проектирования строительных конструкций : СН 2.01.01-2019. – Введены 08.09.2020. – Минск : Минстройархитектуры. – 2020. – 90 с.
11. Деревянные конструкции : СП 5.05.01-2021. – Введены 01.06.2021. – Минск : Минстройархитектуры. – 2021. – 115 с.
12. Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Объемный вес, собственный вес, функциональные нагрузки для зданий : СН 2.01.02-2019. – Введен 08.09.2020. – Минск : Минстройархитектуры. – 2020. – 41 с.
13. Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Снеговые нагрузки : СН 2.01.04-2019. – Введены 08.09.2020. – Минск : Минстройархитектуры. – 2020. – 43 с.
14. Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Ветровые воздействия : СН 2.01.05-2019. – Введены 08.09.2020. – Минск : Минстройархитектуры. – 2020. – 128 с.
15. Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 1-6. Общие воздействия. Воздействия при производстве строительных работ : ТКП EN 1991-1-6-2009 (02250). – Введен 01.01.2010. – Минск : Минстройархитектуры. – 2009. – 32 с.
16. Воздействия на здания в соответствии с требованиями Еврокодов / В. В. Тур [и др.] ; под ред. В. В. Тура, А. Б. Шурина. – Брест : Издательство БрГТУ, 2020. – 81 с.
17. Металлические конструкции / А. Б. Шурин [и др.] ; под ред. А. Б. Шурина. – Брест : Издательство БрГТУ, 2020. – 177 с.
18. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия : ГОСТ 27772. – Введен 01.05.2017. – М. : Стандартиформ. – 2016. – 21 с.
19. Стальные конструкции : СП 5.04.01-2020. – Введен 01.10.2021. – Минск : Минстройархитектуры РБ. – 2021. – 153 с.
20. Прокат сортовой стальной горячекатаный круглый. Сортамент : ГОСТ 2590-2006 (EN 10060:2003, NEQ). – Введен 7.12.2006. – М. : Стандартиформ. – 2012. – 5 с.
21. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Сортамент : ГОСТ 8732. – Введен 22.03.78. – М. : ИПК Издательство стандартов. – 2004. – 9 с.
22. Бетонные и железобетонные конструкции : СП 5.03.01-2020. – Введены 16.11.2020. – Минск : Минстройархитектуры РБ. – 244 с.
23. Древесина конструкционная. Классы прочности : СТБ EN 338-2011. – Введен 28.10.09 2011. – Минск, Госстандарт. – 2011. – 11 С.
24. Конструкции деревянные. Древесина клееная многослойная. Классы прочности и определение характеристических значений : СТБ EN 1194-2011. – Введен 01.07.2012. – Минск, Госстандарт. – 2011. – 13 с.
25. Фанера. Требования : СТБ EN 636-2004. – Введен 01.07.2005. – Минск, Госстандарт. – 2014. – 16 с.

Учебное издание

**Авторы:**

*Найчук Анатолий Яковлевич  
Захаркевич Иван Филиппович  
Шурин Андрей Брониславович*

# **Арки из древесины и материалов на ее основе**

**УЧЕБНО–МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ**  
по дисциплине «Конструкции из дерева и пластмасс»  
для студентов специальности 1–70 02 01  
«Промышленное и гражданское строительство»  
дневной и заочной формы обучения

Ответственный за выпуск: Найчук А. Я.  
Редактор: Митлошук М. А.  
Компьютерная вёрстка: Соколюк А. П.  
Корректор: Дударук С. А.

ISBN 978-985-493-548-5



9 789854 935485

Издательство БрГТУ.  
Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных  
изданий № 1/235 от 24.03.2014 г., № 3/1569  
от 16.10.2017 г. Подписано в печать 14.03.2022 г.  
Гарнитура «Agiat». Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага «Performer». Уч. изд. л. 4,25. Усл. печ. л. 3,95.  
Заказ № 233. Тираж 17 экз. Отпечатано на ризографе  
Учреждения образования «Брестский  
государственный технический университет».  
224017, г. Брест, ул. Московская, 267.