

## ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ДЕРЕВЯННОГО СЕТЧАТОГО СВОДА С ОРТОГОНАЛЬНОЙ ЯЧЕЙКОЙ

Локтев Д.А.

Научный руководитель – профессор Инжутов И.С.  
*Сибирский федеральный университет*

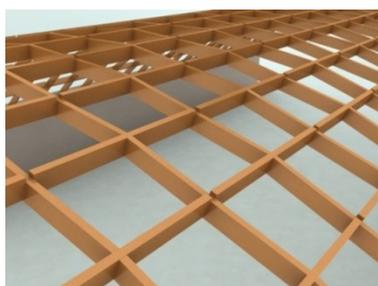
В мировой практике в разные исторические периоды широко применялись своды с шипами системы С.И. Песельника и своды с узлами на болтах системы Цолльбау. Характерными их особенностями являются: стандартность и небольшие размеры элементов, что положительно влияет на транспортабельность элементов при их перевозке, простота и быстрота сборки, возможность устройства кровельного настила непосредственно на конструкцию.

Малоизученным направлением в области проектирования кружально-сетчатых сводов является свод с ортогональной ячейкой (рис. 1).

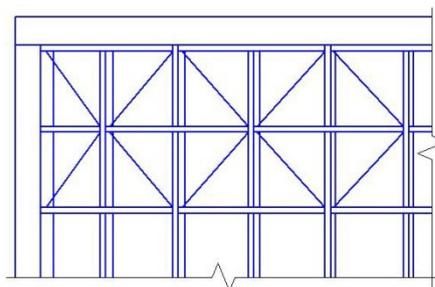
Конструктивный тип подобных пространственных деревянных конструкций - свод при прямоугольном плане и опирание на продольные стороны. В поперечном сечении свод имеет правильное многоугольное очертание. Неизменяемость свода обеспечивается межузловыми связями, в качестве которых использована перфолента. Распор свода закреплён горизонтальными затяжками, выполненными из круглой стали. В итоге, здание - отапливаемое.

Помимо того, что данный свод обладает всеми перечисленными особенностями классических сводов, его конструкция по сравнению с традиционными имеет некоторые преимущества:

1. Все косяки свода имеют постоянное по длине однотипное прямоугольное сечение, что минимизирует их заводскую обработку и, соответственно, положительно сказывается на снижении ее стоимости.
2. Благодаря ортогональному расположению косяков отпадает необходимость устройства фронтовой (обрамляющей) арки по торцам конструкции.



а)



б)

Рис. 1. Сетчатый свод с ортогональной ячейкой: а) фрагмент свода (межузловые связи условно не показаны); б) схема расположения косяков и межузловых связей

В узле (рис. 2) набегающие косяки соединены со сквозным косяком с помощью двух тяжей. Для установки тяжей в проектное положение в косяках выполнены отверстия под диаметр тяжей и монтажные пазы с необходимой глубиной для затяжки гаек.

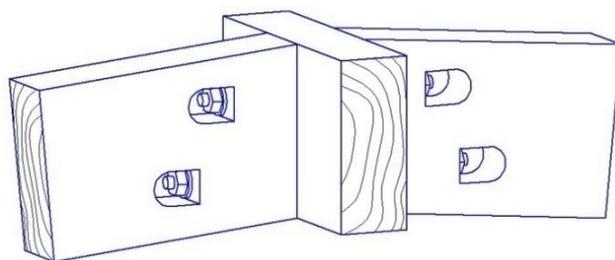


Рис. 2. Узел свода с ортогональной ячейкой

Достаточно высокие показатели предлагаемого узлового решения достигаются в результате более рационального соединения косяков свода в узлах сетки с помощью лобового упора с использованием как минимум двух металлических тяжей, что позволяет считать узел жестким, расположения монтажных пазов для установки гаек в нейтральной зоне напряжений.

Однако, подобные конструкции достаточно сложны для расчета, и объективно оценить работу всей конструкции с учетом пространственной работы системы и особенностей узлового соединения косяков возможно только при помощи современных программных комплексов.

Проблема безопасной эксплуатации сооружений тесно связана с выбором расчетной схемы на проектной стадии. Статические расчеты свода выполнены с использованием проектно-вычислительного комплекса SCAD. Анализ были подвергнуты три расчетные модели.

Первые две модели заданы с помощью стержневых конечных элементов с заданными характеристиками сечений элементов с помощью программы-сателлита Консул, соединенных между собой жестко и шарнирно, соответственно. В третьей модели косяки свода аппроксимированы прямоугольными оболочечными конечными элементами.

Нагрузки на свод соответствуют IV снеговому району [2,4 кПа]. Пролет свода – 18 м, строительная высота – 4 м, сечение косяков 100×250 мм, размер ячейки 1150×1150 мм.

Снеговая нагрузка приложена по продольным косякам свода (равномерно распределенная по линии продольных стержневых и пластинчатых элементов) в соответствии с 1 и 2 схемой распределения снеговых нагрузок для зданий со сводчатыми и близкими к ним по очертанию покрытиями.

В первой модели свода в соответствии со 2 схемой распределения снеговой нагрузки как наиболее неблагоприятной, максимальное продольное усилие в косяке составило  $N = 21,8$  кН, чему соответствует максимальное нормальное напряжение  $\sigma = 0,87$  МПа. Максимальные суммарные перемещения узлов достигаются примерно в  $\frac{1}{4}$  пролета и равны 33 мм.

Во второй модели свода максимальное продольное усилие в косяке оказалось равным  $N = 26,2$  кН, и, таким образом, максимальное нормальное напряжение составило  $\sigma = 1,05$  МПа. Максимальные суммарные перемещения узлов, как и в первой модели свода, достигаются примерно в  $\frac{1}{4}$  пролета и равны 650 мм.

Следует заметить, что в стержневых схемах свода весьма затруднительно с достаточной степенью точности смоделировать конструктивные особенности узловых сопряжений косяков, например, таких, как специальные монтажные пазы, деформации смятия древесины под шайбами тяжей, собственные деформации металлических тяжей и другие.

Эти трудности можно преодолеть путем применения расчетной модели, смоделированной с помощью оболочечных элементов с заданными характеристиками сечений элементов. Численные исследования пластинчатой системы позволяют более подробно оценить работу косяков в целом и узлов свода в частности.

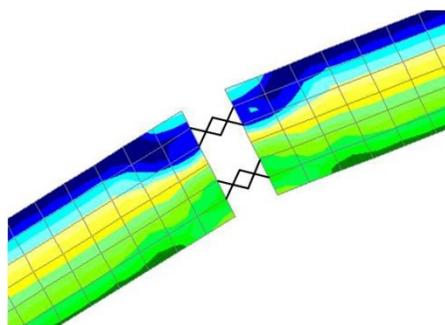


Рис. 3. Модель узла сопряжения косяков свода

В пластинчатой модели для имитации работы одного металлического тяга использовались четыре перекрестных стержня (рис. 3). Это обусловлено тем, что при моделировании тяга только одним стержнем в нем возникает достаточно большое поперечное усилие, что, во-первых, не соответствует реальному значению, а во-вторых, определяет высокую деформативность узла и, в конечном счете, достаточно большую деформативность свода в целом.

Максимальное усилие растяжения в металлическом тяге получено путем суммирования продольных усилий в стержнях расчетной модели с учетом проекций на ось (касательная к окружности свода в точке рассматриваемого узла), которое составило 88,0 кН для нижнего стержня и 50,4 кН - для верхнего стержня.

К достоинствам пластинчатой схемы по отношению к стержневой относится возможность смоделировать пазы на элементе. Как видно из рис. 3 изополя нормальных напряжений меняют свое направление в сторону расположенных пазов, однако значения напряжений не увеличиваются. Отсюда можно сделать вывод, что пазы находятся в нейтральной зоне напряжений.

Под действием неравномерно распределенной снеговой нагрузкой максимальное напряжение сжатия  $\sigma_c = 7,90$  МПа в верхней части косяков свода и максимальные напряжения растяжения  $\sigma = 5,60$  МПа в нижней части косяков свода достигаются приблизительно в  $\frac{1}{4}$  пролета. Максимальные суммарные перемещения узлов также достигаются примерно в  $\frac{1}{4}$  пролета и равны 51 мм.

Вывод: были выполнены три способа расчета для анализа работы деревянного сетчатого свода. Первые два способа выполнены с помощью стержневых конечных элементов с жесткими и шарнирными узлами соответственно. Численные испытания стержневой модели могут только показать напряженно-деформированное состояние конструкции в целом без учета локальных напряжений, что в данном случае не является достаточным для оценки объективной работы конструкции. Максимальные напряжения составили 0,87 МПа и 1,05 МПа для расчетных моделей с жесткими и шарнирными узлами соответственно. Применение как жесткого, так и шарнирного способа соединения элементов малоприменимы для данного конструктивного решения узла. Полученная разница в результатах максимальных перемещений наглядно показывают разницу в применении различных способов соединения стержневых элементов, которая составила более 600 мм.

Третий способ выполнен с помощью пластин. Это позволило более подробно смоделировать работу косяков и узлов соединения и, соответственно, определить необходимые локальные напряжения в наиболее нагруженных участках косяка, учесть конструктивные особенности косяков.

Полученные результаты найденных локальных напряжений, которые составили 7,90 МПа и 5,60 МПа для сжатия и растяжения соответственно, в 7-9 раз больше напряжений, полу-

ченных в стержневой модели. Также использование пластин дает предпосылки для расчета расположения пазов на косяке, их размера, подбора металлических тяжей, размера шайб.