

геометрической линейности подхода. Переход напряжений через предел текучести материала возникает в моменты времени $T_{пред}$ и при нагрузках $P_{пред}$ более низких, чем это ожидается при статическом подходе.

Для короткого времени нагружения, сравнимого с периодом собственных продольных колебаний стержня (случай $T_{кр} = 10^{-2}c$), решение показывает, что динамические поперечные перемещения остаются малыми и скорость их роста ниже, чем квазистатических, а динамические напряжения в стержне остаются невысокими – стержень не успевает реагировать на изменение нагрузки. Это связано с запаздыванием нарастания перемещений относительно нагрузки в первом полупериоде колебаний за счет инерционности системы (амплитуда колебательного движения здесь отрицательна).

Влияние продольных перемещений, массы M_0 , угла наклона дополнительной нагрузки невелико и перекрывается ролью эксцентриситета и динамичностью процесса поперечного движения точек стержня.

В полученном решении не вполне отражаются динамические свойства системы, связанные с проявлением высоких компонент частотного спектра, которые прямо наблюдаются при ударных испытаниях [1]. Поэтому для уточнения результатов необходимо использование более сложных многомассовых и нелинейных моделей.

Список цитированных источников

1. Вольмир, А.С. Устойчивость деформируемых систем. – М.: Наука, 1967. – 986 с.

УДК 694.5

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АРОЧНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Храмов В. С.

Большепролётными принято считать конструкции с пролётом 18 метров и более – для гражданских зданий и пролётом более 30 метров – для промышленных зданий [1]. Применение большепролётных конструкций позволяет наиболее полно раскрыть несущие характеристики материала [2]. Подобные конструкции получили широкое распространение в случаях, когда необходимо перекрыть большие пространства без промежуточных опор.

По статической работе большепролётные конструкции можно разделить на две группы:

- 1) плоскостные (балки, фермы, арки, рамы);
- 2) пространственные (оболочки, складки, висячие системы, перекрестно-стержневые системы и др.) [2].

Одними из самых распространённых большепролётных конструкций являются арочные конструкции.

Арочными конструкциями называются системы ломаного или криволинейного очертания, в опорах которых от действия вертикальной нагрузки возникают наклонные реакции, направленные внутрь пролёта. Горизонтальную состав-

ляющую такой наклонной реакции называют распором. Для восприятия распора используют либо затяжки, выполняемые из металлического профиля, либо опирают арку непосредственно на фундамент, который и воспринимает распор.

По форме очертания оси арочные конструкции делят на:

- 1) треугольные;
- 2) сегментные;
- 3) стрельчатые.

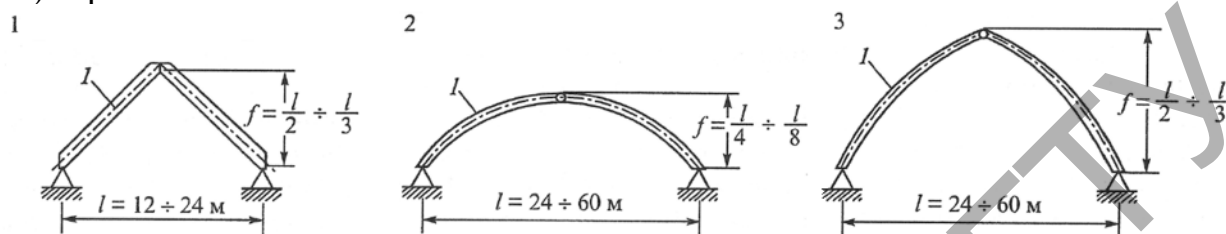


Рисунок 1 – Формы очертания арочных конструкций

Клееные арки стрельчатого очертания имеют трёхшарнирную схему и сегментное очертание полуарок. Их применяют при пролётах $l = 24 \div 60 \text{ м}$

и высот стрелы $f = l/2 \div l/3$ подъёма. В большинстве случаев стрельчатые арки применяют без затяжек с опиранием на фундамент, передавая на него все вертикальные и горизонтальные реакции опор [3].

Клеедеревянные арки в большинстве случаев проектируют с прямоугольным сечением, постоянным по длине пролёта, независимо от формы её очертания. Сечение выполняется прямоугольной формы с рекомендуемым отношением сторон [4] и $b/h \leq 5$ комплектуется из пакета досок, монолитно соединённых между собой клеевыми швами.

Стрельчатые клеедеревянные арки более трудоёмки в изготовлении по сравнению с арками других очертаний, так как требуют разработки большего количества отправочных марок, различных по размеру. Их применяют в качестве несущих конструкций покрытий промышленных и общественных зданий. Так, наиболее рационально использование арок стрельчатого очертания в покрытиях, где помимо распределённых нагрузок существенной становится также сосредоточенная в зоне конькового узла нагрузка от различного оборудования (транспортная галерея, тельфер с грузом и т. д.).

Нагрузка от собственного веса арки и веса покрытия (постоянная, равномерно распределённая нагрузка) учитывается в первую очередь при расчёте усилий в сечениях арки. В реальных условиях эксплуатации часто на арку действует не только постоянная нагрузка, но и временная – снеговая и ветровая. Если ветровая нагрузка принимает серьёзные значения только для подъёмистых арок, то временная снеговая нагрузка, неравномерно распределённая по пролёту арки, часто в несколько раз увеличивает усилия, возникающие в сечениях арки. Сочетание временной снеговой и постоянной нагрузок обычно становится определяющей при расчёте внутренних усилий в арке. Так, согласно пособию к СНиП II-25-80, расчёт стрельчатых арок на прочность рекомендуется выполнять для следующих сочетаний нагрузок:

– расчётная постоянная и временная (снеговая) нагрузки на всём пролёте и временная нагрузка от подвесного оборудования;

– расчётная постоянная нагрузка на всём пролёте, временная (снеговая) на $S/2$ или части пролёта в соответствии со СНиП «Нагрузки и воздействия» и временная нагрузка от подвесного оборудования;

– ветровая нагрузка с постоянной и остальными временными (с учётом коэффициента сочетания 0.9) [5].

Определив внутренние усилия, выбирают их максимальные значения и по ним производят подбор сечения.

Как можно заметить из сказанного выше, основной нормативный документ, используемый при проектировании деревянных конструкций, устарел более чем на 30 лет. За время, прошедшее с выхода СНиП II-25-80, было проведено множество теоретических и экспериментальных исследований древесины, учитывающих анизотропию материала. Также была доказана возможность стыкования блоков древесины вдоль волокон. Интересно и то, что в нормах содержатся указания для использования коэффициента длительно работавшей древесины. Вместо умножения расчётное сопротивление делят на этот коэффициент. Подобный ход решения даёт удивительный результат: через 50-100 лет материал становится на 10 % прочнее. В 1988 г. ЛИСИ были опубликованы исследования, которые показали, что подобных коэффициентов несколько: их величины зависят от вида НДС и срока службы. В Белоруссии нормы проектирования деревянных конструкций содержат шесть таких коэффициентов, отличных от единицы: от 0,9 до 0,5, и каждый из них умножают на соответствующие расчётные сопротивления, тем самым понижая его [6].

Вместе с тем, в нормах проверка устойчивости плоской формы деформирования криволинейных сжато-изгибаемых элементов ведётся исходя из формул, которые предполагают линейную работу древесины как материала, не учитывая её анизотропию и связи, обеспечивающие пространственную жёсткость сооружения [7].

Помимо недостатка точных данных в нормах проектирования исследователи обычно выделяют и различные отрицательные свойства древесины как строительного материала. Среди них:

- зависимость свойств материала от характера его строения;
- различные пороки древесины, снижающие её несущие характеристики;
- необходимость применения и значительный расход качественного пиломатериала;
- излишняя массивность сечений;
- ползучесть при длительном нагружении.

Все эти недостатки сильно ограничивают применение древесины и снижают её характеристики. Большинство из них можно устранить путём армирования сечений клеедеревянных конструкций и элементов стальной или стеклопластиковой арматурой. Благодаря армированию деревянных конструкций решаются следующие вопросы:

- экономия качественной древесины (т. е. вместо древесины 1-го сорта больше применяется пиломатериал 2-го и 3-го сортов);
- снижение монтажной массы и стоимости;
- уменьшение площади и размеров поперечного сечения;

– обеспечение требуемых показателей прочности и жёсткости элементов строительных конструкций;

– повышение надёжности конструкций.

По сравнению с клееными конструкциями той же прочности и жёсткости, армированные требуют на 30-40% древесины меньше, что снижает затраты на 12-18% на 1м³ конструкции (при увеличении трудозатрат на изготовление – на 10-15%), уменьшение монтажной массы на 10-12% [8].

Однако арматура в конструкциях зачастую испытывает растягивающие усилия, поэтому, прежде всего, необходимо определиться с местом арматуры в сжато-изгибаемых арочных конструкциях. Растягивающие усилия в арке появляются при изгибе, поэтому рабочая арматура должна располагаться в верхней и нижней зонах сечения. Из-за меняющихся положений временной нагрузки в сечениях арок появляются моменты с противоположными знаками, что также говорит о необходимости использования двойного армирования. Армирование сечений арок назначается расчётом и меняется по длине арки соответственно изменению изгибающих моментов. В арках нецелесообразно использование предварительно напряжённой арматуры из-за отсутствия растягивающих усилий. Применение в арочных конструкциях предварительно сжатой арматуры оказывает обратный эффект и снижает сопротивление сечений сжимающим усилиям.

Практически одновременно с появлением композитной арматуры начал обсуждаться вопрос о возможности её применения для армирования деревянных конструкций. Композитной арматурой принято называть неметаллические стержни из стеклянных, базальтовых, углеродных или арамидных волокон, которые пропитывают терморезактивным или термопластичным полимерным связующим и отверждают. Такая арматура обладает набором физико-механических свойств, которые позволяют рассматривать в качестве замены металлической. При этом, в сравнении со стальной, композитная арматура обладает некоторыми существенными недостатками. В частности, стеклопластиковая и базальтопластиковая арматуры имеют модуль упругости, который в 3-4 раза ниже, чем у стальной. Нагрев композитной арматуры в несколько раз снижает её прочностные свойства. Одновременно с этим композитная арматура не имеет площадки текучести, и поэтому разрушение при растяжении носит хрупкий характер. Невозможно и изготовление гнутых арматурных изделий. Композитная арматура имеет также более высокую стоимость по сравнению с металлической [9].

Главной проблемой при проектировании деревянных конструкций, армированных композитной арматурой, является практически полное отсутствие соответствующих норм проектирования. В современных нормативных документах им посвящено всего несколько абзацев [10].

Наиболее активно развивающимся направлением в развитии клеедеревянных армированных конструкций стало использование углеродных нановолокон. Испытаниями на индивидуальной структуре были подтверждены уникальные механические, электрические и термические свойства углеродных нанотрубок. Так, модуль Юнга подобных структур равен 1000 ГПа, а прочность на разрыв – 60 ГПа.

Деревоклееные композитные конструкции (ДКК) состоят из используемой совместно с древесиной стеклоткани на основе базальтового волокна и эпоксидной матрицы, в состав которой включаются углеродные нанотрубки.

Были проведены экспериментальные исследования балок сечением 100x70 мм. В растянутой зоне балки на эпоксидную матрицу смолой ЭД-20, в состав которой добавили углеродные нанотрубки, приклеивалась стеклоткань. Конструирование деревокомпозитных балок подобным образом обеспечивает уменьшение размеров поперечного сечения на 20-25%, увеличение прочности балки – на 34-56%, снижение деформативности – на 24-42% в сравнении с обычными деревянными балками.

Стеклоткань отличается от обычной стержневой композитной арматуры возможностью использования в более широком диапазоне температур. Подобные конструкции не магнитны и радиопрозрачны, так же как и элементы, изготовленные только с применением древесины. В отличие от цельнодеревянных, разрушение деревокомпозитных балок носит пластичный характер [11].

Исследования армированных деревянных конструкций, как видно из приведённых выше примеров, чаще всего проводятся на линейных элементах (балках). Поэтому информации об армированных деревянных арочных конструкциях сравнительно немного.

Но, исходя из вышеизложенных особенностей армирования арочных конструкций, можно сделать вывод, что в случае клеедеревянных арочных конструкций рационально применение стеклоткани, которую приклеивают в верхней и нижней зонах сечения.

Несмотря на все усовершенствования и нововведения в проектировании клеедеревянных конструкций, их расчёт до сих пор остаётся сложной и ответственной задачей. В особенности это касается арочных конструкций, так как зачастую они используются для перекрытия общественных зданий, где особенно важна надёжность и гарантия нормальной работы конструкции, которая не приведёт к её разрушению. Поэтому современные проектировщики и конструкторы для получения более точных результатов проводят расчёт не вручную, а в различных вычислительных комплексах и с использованием САПР.

В числе таких программ Lira, SCAD, Ansys и др. Первые два вычислительных комплекса основываются на методе конечных элементов (МКЭ). Применение подобных «инструментов» проектирования открывает новые возможности для оценки влияния деформированного состояния конструкции на напряжённое состояние. Это, в первую очередь, актуально при расчёте сжато-изгибаемых большепролётных конструкций. Вышеназванные программные комплексы позволяют решать эту задачу с учётом геометрической нелинейности.

Так, Гранкин Кирилл Владимирович провёл исследование, в ходе которого рассчитал одну и ту же сжато-изгибаемую клеедеревянную конструкцию в программах Lira и SCAD. После расчётов он пришёл к следующим выводам:

- расчёту с учётом геометрической нелинейности в SCAD с использованием шагово-итерационного метода нельзя доверять;

- сходимость результатов в двух программах при шаговом методе достигается только после 20 шага, при этом разница между значениями изгибающих моментов не более 0,5%;

– значение коэффициента ξ по СП 64.13330.2011 на 6-8% меньше, чем по результатам расчёта в SCAD и Lira;

– формула для расчёта сжато-изгибаемых большепролётных конструкций, приведённая в СП 64.13330.2011, даёт в результате напряжения в конструкции значения, которые завышены на 10-20%;

– на этапе работы в упругой стадии (до достижения расчётных сопротивлений) влияние деформаций на напряжённое состояние конструкции не превышает 5%, это условие находит своё отражение в американских нормативах для расчёта сжато-изгибаемых большепролётных конструкций;

– большепролётные сжато-изгибаемые деревянные конструкции с применением армирования либо без армирования следует рассчитывать при помощи современных программных комплексов, позволяющих учесть геометрическую нелинейность, что сделает возможным уменьшение размеров сечений (оптимизация), а также снизит потребление качественной древесины первого сорта и, в целом, повысит конкурентоспособность применения древесины в большепролётных конструкциях [12].

Проанализировав представленный обзорный материал, можно выделить несколько существенных проблем, напрямую относящихся к деревянным армированным арочным конструкциям:

– отсутствие нормативной документации для проектирования деревянных конструкций, соответствующей данным, полученным из последних проведённых исследований;

– устаревшие нормативные сведения, касающиеся проектирования арочных конструкций;

– отсутствие норм проектирования, учитывающих применение композитной или стеклопластиковой арматуры [13];

– нехватка информации по исследованиям армированных деревянных арочных конструкций, в особенности армированных композитной арматурой;

– несоответствие некоторых характеристик, используемых вычислительными комплексами, установленным нормам.

Большинство проблем, как можно заметить, связано либо с отсутствием, либо с устареванием норм проектирования. Однако авторы источников, использованных для обзора, часто говорят о том, что те или иные решения, которых недостаёт в отечественных нормах, давно уже используются в зарубежной нормативной документации. Из этого следует, что при дальнейшей проработке материала необходимо изучить зарубежный опыт в обозначенном вопросе.

Также существенным препятствием является и практически полное отсутствие информации по армированным деревянным арочным конструкциям, что прямо говорит об актуальности темы исследования.

Для ускорения вычислений и более точной оценки результатов важно применение вычислительных комплексов (ВК). Но, как следует из вышеизложенного, необходимо либо проводить проверку полученных результатов, либо исправлять неверные значения характеристик, содержащихся в вычислительных комплексах.

Список цитированных источников

1. Конструкции большепролётных зданий и сооружений. Правила эксплуатации: СП 304.1325800.2017 Введ. 2018-04-26. – М.: АО ЦНИИ Промзданий, 2017. – 56 с.
2. Артебякина, Г.И. Обзор конструктивных решений арочных покрытий для общественных зданий / Г.И. Артебякина, В.А. Щербина // Молодой ученый. – 2017. – № 6. – С. 29-31.
3. Кашеварова, Г.Г. Экспериментально-теоретические исследования устойчивости и верификация расчётных моделей большепролётных деревянных арок / Г.Г. Кашеварова, А.Ю. Зобачева, И.Н. Фаизов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2011. – № 2. – С. 83-90.
4. Деревянные конструкции: СП 64.13330.2011. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. Введ. 2011-05-20. – М.: ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, 2011. – 76 с.
5. Пособие по проектированию деревянных конструкций (к СНиП II-25-80) / ЦНИИСК им. Кучеренко. – М.: Стройиздат, 1986.
6. Серов, Е.Н. Клееные деревянные конструкции: состояние и проблемы развития / Е.Н. Серов, Б.В. Лабудин // ИВУЗ. «Лесной журнал». – 2013. – № 2.
7. Кашеварова, Г.Г. Исследование устойчивости клееных деревянных большепролётных арок / Г.Г. Кашеварова, А.Ю. Зобачева, И.Н. Фаизов // Вестник ПНИПУ. – 2010. – № 1. – С. 22-31.
8. Рощина, С.И. Армирование – эффективное средство повышения надёжности и долговечности деревянных конструкций / С.И. Рощина // ИВУЗ «Лесной журнал». – 2008. – № 2. – С. 71-74.
9. Окольников, Г.Э. Перспективы использования композитной арматуры в строительстве / Г.Э. Окольников, С.В. Герасимов // Экология и строительство. – 2015. – № 3. – С.14-21.
10. Иномназаров Т.С. Применение композитной арматуры / Т. С. Иномназаров, А.М. Аль Сабри Сахар, М.Х. Дирие // Системные технологии. – 2018. – № 27. – С. 24-28.
11. Рощина, С.И. Армированные деревянные конструкции / С.И. Рощина, М.С. Сергеев, А.В. Лукина // ИВУЗ «Лесной журнал». – 2013. – № 4. – С. 80-85.
12. Гранкин, К.В. К расчёту сжато-изгибаемых клеелесных конструкций по деформированной схеме с помощью учёта геометрической нелинейности в комплексе SCAD Office 11.5 и Lira Soft 9.6 [Электронный ресурс] / К. В. Гранкин // Интернет-журнал «Наукосведение». – 2016. – № 4(8). – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru> – (10.03.2019).
13. Устарханов, О.М. Схема армирования дощатоклееной балки стеклопластиковым прутком / О.М. Устарханов, Г.Г. Ирзаев // Современное строительство и архитектура. – 2018. – № 3 (11). – С. 16-20.

УДК 620.1:674.8

ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НОВОГО КОМПОЗИТНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ ЦЕМЕНТНО-СТРУЖЕЧНОЙ ПЛИТЫ И УГЛЕВОЛОКНА

Шалобыта Н. Н., Шалобыта Т. П., Лазарук А. А

Введение. В настоящее время численное моделирование становится неотъемлемой частью при разработке, совершенствовании и исследовании строительных конструкций. Достигнутый на данный момент уровень развития вычислительной техники, как по быстродействию, так и по объёму оперативной памяти, и одновременно с этим широкое внедрение многопроцессорных систем позволяют реализовывать более сложные нелинейные математические модели