

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА АРОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КЛЕЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ

**Введение.** Во всем мире, с каждым годом, конструкции с клееной древесиной (ККД) приобретают все более широкое распространение в зданиях и сооружениях различного назначения [1]. Применение ККД позволяет уменьшить вес несущих конструкций в сравнении с аналогами из сборного железобетона почти в 5 раз, а трудоемкость монтажа более чем в 2 раза [2].

Наиболее широкое применение ККД получили как пролетные конструкции для перекрытия больших (30-36 м) и очень больших (более 50 м) пролетов: это кинотеатры, крытые рынки, бассейны, аквапарки, выставочные и спортивные залы, легкоатлетические манежи, конно-спортивные сооружения, складские здания с химически агрессивной к металлу и бетону средой и т.д. Эксплуатационная надежность и долговечность ККД в агрессивной среде действующих калийных предприятий уже превышает 40 лет, что значительно больше аналогичных конструкций из железобетона и стали [3]. Однако информации о расчете таких ККД в учебной и нормативной литературе постсоветского пространства недостаточно.

В последнем советском СНиП II-25-80 [4] отсутствуют конкретные указания относительно определения расчетных напряжений в арках из клееной древесины, по умолчанию рекомендуется пользоваться методикой для элементов, работающих на сжатие с изгибом. Так, в руководстве к СНиП II-25-80 [5] приведен пример, в котором нормальные напряжения в расчетном сечении арки определяются с помощью формулы проф. Завриева К.С. (1). Данная формула выведена с учетом деформированной схемы прямолинейных внецентренно-сжатых элементов [6]. Для арочных, а в принципе и любых криволинейных элементов, она подходит весьма условно, и значительно завышает значения внутренних усилий в расчетных сечениях арки, как следствие, приводит к увеличению внутренних напряжений.

В европейском нормативном документе EN 1995-1-1: 2008 (ДСТУ-Н Б EN 1995-1-1: 2010) [7], основные положения которого почти без изменений приняты в ДБН В.2.6 - 161: 2010 «Конструкции зданий и сооружений. Деревянные конструкции» [8], содержится общая рекомендация по необходимости учета деформированной схемы при расчете ККД, однако формул по расчету не приводится.

Для криволинейных элементов в зависимости от приложенной нагрузки прогиб может как увеличивать, так и уменьшать кривизну элемента. Основной особенностью расчета в деформированном состоянии является то, что под первоначальной нагрузкой появляются перемещения, изменяющие исходное положение оси системы. При этом нарушается линейная зависимость между силами и перемещениями. В геометрически нелинейных задачах отсутствует прямая пропорциональность между деформациями и напряжениями. Анализируя расчет и результаты опыта систем ломаного очертания, можно прийти к выводу, что учет деформированной схемы в отечественной практике проектирования необъективно отражает действительное напряженно-деформированное состояние [9].

Целью исследования является уточнение необходимости учета деформированной схемы при расчете арок из клееной древесины. Для достижения данной цели были решены следующие задачи: 1) проведены численные исследования по определению изгибающего момента по ДСТУ-Н Б В.2.6-184 2012 [10] (который в этом отношении наследует СНиП II-25-80) и методами строительной ме-

ханики с учетом геометрической нелинейности и без ее учета для пологих и стрельчатых арок; 2) проведен анализ полученных численных исследований и предложена методика расчета арок; 3) проанализированы различия между полученными значениями моментов; 4) проведен анализ расходов материалов по предложенной методике расчета и расчетом по ДСТУ-Н Б В.2.6-184 2012.

**Методика исследований.** Задачи расчета реализуются в программном комплексе Lira SAPR 2013 с использованием анализа методом конечных элементов (МКЭ) в плоской постановке двумя способами. Постоянная нагрузка на арки принята для всех типов одинаковой - 7,846 кН / м. Снеговая нагрузка для пологих и стрельчатых арок приложена согласно ДБН В.1.2-2: 2006 «Нагрузки и воздействия» [11].

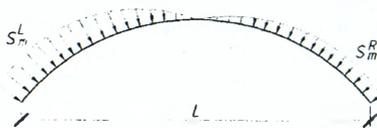


Рисунок 1 – Снеговая нагрузка на пологую арку

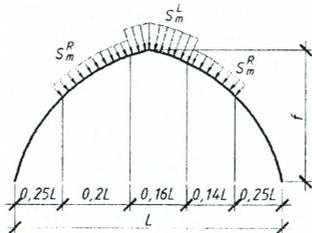


Рисунок 2 – Снеговая нагрузка на стрельчатую арку

$S_m^L = 18,62 \text{ кН/м}$ ,  $S_m^R = 9,31 \text{ кН/м}$

Для линейного расчета был использован конечный элемент № 10, тип -- универсальный пространственный стержневой конечный элемент (КЭ). Арки разбивались на 40 КЭ. Опоры – шарнирные. Для нелинейного расчета КЭ был заменен на конечный элемент № 310, тип – геометрически нелинейный универсальный стержневой КЭ. Для моделирования нелинейной нагрузки был задан шаговый метод. Метод расчета – автоматический выбор шага с поиском новых форм равновесия. Минимальное количество итераций – 300, количество шагов – 3. Все шаги равномерные с точностью 0,0001.

Моделируемые арки были трех типов: 1) пологие двухшарнирные; 2) пологие трехшарнирные; 3) стрельчатые; с различной величиной стрелы подъема - от  $f = 1/4$  до  $f = 1/7$  для пологих и от  $f = 1/2$  до  $f = 1/3$  для стрельчатых арок. Конечным элементам были предоставлены свойства со следующими характеристиками: модуль упругости -  $E = 10000 \text{ МПа}$ , плотность -  $\rho = 600 \text{ кг / м}^3$ , размеры поперечного сечения изменялись в зависимости от величины пролета арки.

**Результаты исследований.** Проведенные многочисленные исследования по расчету арок с помощью программного комплекса Lira SAPR 2013 в геометрически нелинейной постановке (учет деформированной схемы) показали существенное отличие полученных результатов по методике, что содержится в советских нормативных документах и фактически без существенных изменений была перенесена в нормы проектирования Украины, Беларуси и России [12], [13].

На графиках (рис. 3–5) приведены результаты численных исследований. Разница между величинами изгибающих моментов по линейному и нелинейному

расчетам в ПК, а также по ДСТУ-Н Б В.2.6-184 2012 с учетом коэффициента  $k_{m,c}$  (коэффициент, учитывающий появление дополнительного изгибающего момента в деформированной схеме элемента)

$$k_{m,c} = 1 - \frac{N_d}{\varphi_c \cdot f_{c,0,d} \cdot A_{br}} \quad (2)$$

Разница между значениями изгибающих моментов в процентах показана над графиками для линейного и нелинейного расчета и под графиками для нелинейного расчета и расчета по ДСТУ-Н Б В.2.6-184 2012. В данной статье приведены результаты только для пологих двух- и трехшарнирных арок с стрелой подъема  $f=1/7$  и стрельчатых арок с стрелой подъема  $f=1/2$ .

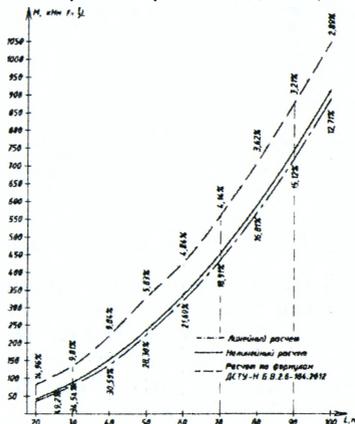


Рисунок 3 – Изгибающие моменты двухшарнирных пологих арок

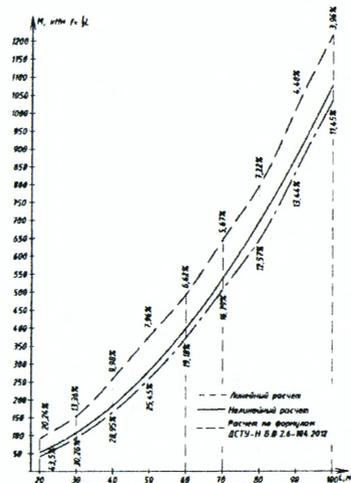


Рисунок 4 – Изгибающие моменты трехшарнирных пологих арок

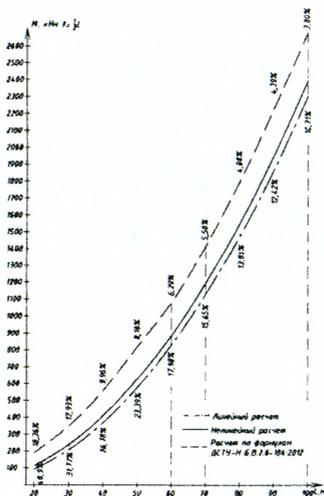


Рисунок 5 – Изгибающие моменты стрельчатых арок

Значения изгибающих моментов с учетом деформированной схемы (геометрической нелинейности) и по обычному расчету (без учета геометрической нелинейности) в программном комплексе Lira SAPR 2013 отличаются:

для пологих двухшарнирных арок – от 2,89% до 14,96%,

для пологих трёхшарнирных арок – от 3,96% до 20,24%,

для стрельчатых арок – от 3,8% до 18,36%.

Значения изгибающих моментов с учетом деформированной схемы (геометрической нелинейности) по методике норм и по результатам расчета в программном комплексе составляет:

для пологих двухшарнирных арок – от 12,71% до 49,2%,

для пологих трёхшарнирных арок – от 11,45% до 43,5%,

для стрельчатых арок – от 10,71% до 40,9%.

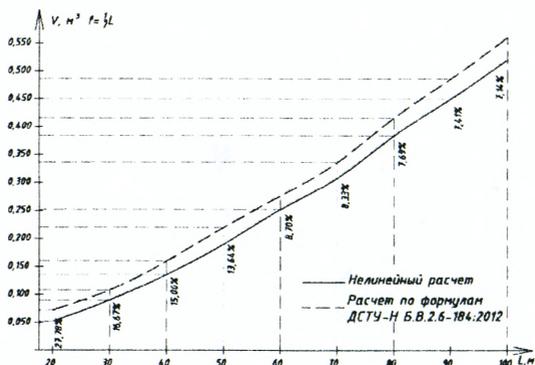


Рисунок 6 – Расходы древесины на 1 м.п. двухшарнирных пологих арок

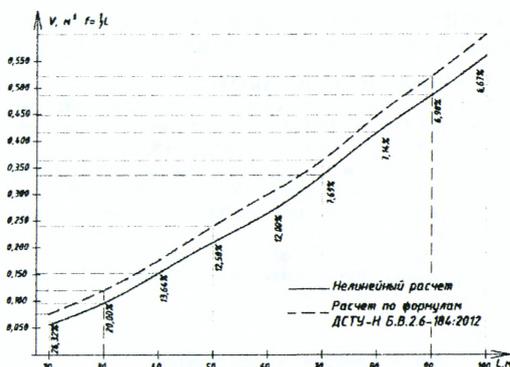


Рисунок 7 – Расходы древесины на 1 м.п. тришарнирных пологих арок

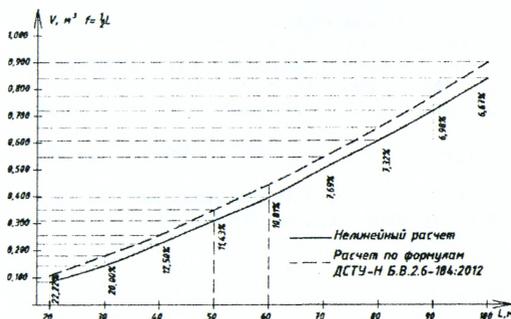


Рисунок 8 – Расходы древесины на 1 м.п. стрельчатых арок

Точный расчет с использованием программных комплексов и учетом геометрической нелинейности позволяет уменьшить расходы древесины:

- для пологих двухшарнирных арок – от 7,14% до 27,78%,
- для пологих трёхшарнирных арок – от 6,67% до 26,32%,
- для стрельчатых арок – от 6,67% до 22,22%.

**Выводы.** Такая погрешность в значениях подтверждает необходимость использования именно геометрически-нелинейного расчета для криволинейных конструкций из клееной древесины. Таким образом, рекомендуется вместо методики ДСТУ-Н Б В.2.6-184 2012 (формула проф. Завриева) при расчете арок использовать современные программные комплексы с расчетом в геометрически-нелинейной постановке. Следует отметить, что уменьшение разницы значений изгибающих моментов происходит с увеличением пролета арок. Также установлена закономерность, что разница между значениями изгибающих моментов увеличивается с ростом радиуса кривизны (или уменьшением стрелы подъема) для пологих и, наоборот, для стрельчатых арок.

Применение формулы (1) для расчета криволинейных элементов недопустимо, поскольку она не отражает действительного напряженно-деформированного состояния конструкции и является неконкурентоспособной в условиях со-

временной рыночной экономики. Разработка современной методики расчета арочных ККД является очень актуальной и важной научной задачей.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Клееные деревянные конструкции в современном строительстве: сб. науч. трудов // О.А. Карунас, К.В. Чернова, И.И. Елькина // Актуальные проблемы архитектуры, строительства и энергосбережения. – Симферополь: НАПКС, 2012. – Вып. 4. – С. 320–324.
2. Найчук, А.Я. Клееная древесина – строительный материал будущего // А.Я. Найчук, С. Васильев // Архитектура и строительство. – № 3. – 2009. – С. 10–15.
3. Калугин, А.В. Деревянные конструкции: учебное пособие (конспект лекций). – М.: Издательство АСВ, 2003. – 224 с.
4. Деревянные конструкции: СНиП II-25-80 / Госстрой СССР – М.: Стройиздат, 1982. – 66 с.
5. Пособие по проектированию деревянных конструкций (к СНиП II-25-80) / ЦНИИСК им. Кучеренко. – М.: Стройиздат, 1986. – 216 с.
6. Клименко, В.С. Конструкции из дерева и пластмасс: учебник / В.С. Клименко – К.: Высшая школа, 2000. – 304 с.
7. Еврокод 5. Проектирование деревянных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для сооружений: ДСТУ-Н Б EN 1995-1-1:2010 – К.: Минрегионстрой, 2010 – 244 с.
8. Конструкции зданий и сооружений. Деревянные конструкции. Основные положения: ДБН В.2.6-161 2010 – К.: Минрегионстрой, 2010 – 102 с.
9. Проектирование деревянных конструкций // Ю.Д. Санников, А.Е. Серов; под. ред. Е.Н. Серова – М.: Издательство АСВ, 2011 – 563 с.
10. Конструкции из цельной и клееной древесины. Руководство по проектированию: ДСТУ-Н Б В.2.6-184 2012. – К.: Минрегионстрой, 2013 – 120 с.
11. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования: ДБН В.1.2-2 2006 – М.: Минстрой Украины, 2006 – 60 с.
12. Деревянные конструкции: СНБ 5.05.01-2000 / Минстройархитектуры. – Минск: Стройтехнорм, 2001. – 70с.
13. Деревянные клееные конструкции. Методы испытаний клеевых соединений при изготовлении: СТО 36554501-004-2006 – Москва, 2006 – 72 с.

УДК 624.011

*Михайловский Д.В., Матющенко Д.Н.*

#### АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА ГНУТОКЛЕЕННЫХ РАМ

Методики расчета гнutoклеенных рам из клееной древесины несколько ограничены. В 70-е годы XX века в нормативных документах не содержалось указаний для расчета гнutoклеенных рам. Лишь после выхода руководства по проектированию клееных конструкций [1] некоторые указания нашли свое отражение в СНиП II-25-80 [2]. Однако содержащиеся там рекомендации дают довольно приблизительное представление о действительном напряженном состоянии карнизного узла гнutoклееной рамы.

Проверка прочности прямолинейных участков рам выполнялась с помощью формул сложного сопротивления (формулы (1) и (2)), а вот проверки максимальных радиальных напряжений в криволинейных участках вообще предусмотрено не было. Формулы (1) и (2), учитывающие работу элементов на сжатие с изгибом, базируются на линеинном распределении напряжений и для криволинейных элементов отличаются лишь введением поправочных коэффициентов  $k_{rn}$  и  $k_{rs}$  к моментам сопротивления сечения. Эти коэффициенты учитывают влияние кривизны на величину краевого напряжения и применяются для гнutoклеенных рам с соотношением

$$h/r \geq \frac{1}{7}.$$