

Конечно, полученных данных недостаточно, чтобы делать обобщающее заключение, но если учесть, что образцы брали из различных рулонов, поставленных в различное время, то некоторые выводы сделать можно.

1. Оборудование для прокатки стальной ленты требует технической проверки.

2. Операции подготовки полотна ленточной пилы (сварка, вальцевание, формирование режущей части зуба и т. д.) должны выполняться с максимальной тщательностью, т. к. изменение толщины ленты оказывает неблагоприятное влияние на ее напряженно-деформированное состояние.

3. Поскольку изменение толщины полотна ленточной пилы в определенной степени является возбудителем колебаний системы механизма резания станка, необходима периодическая проверка состояния механизма натяжения.

Для получения более надежной информации и исключения влияния случайных факторов на результаты измерений эксперименты необходимо продолжить.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Дифференциальный прибор для определения оптических искажений листового стекла / М. Н. Медведев, Б. Д. Егоров, М. А. Зейзин, В. Н. Лобанов // Стекло и керамика.— 1980.— № 7.— С. 7. [2]. Прокофьев Г. Ф. Интенсификация пиления древесины рамными и ленточными пилами.— М.: Лесн. пром-сть, 1990.— 232 с.

УДК 539.37/38 : 691.11

Л. Г. ШАПОВАЛОВА, Ю. А. ВАРФОЛОМЕЕВ,  
Б. В. ЛАБУДИН, А. В. ВЕШНЯКОВ

ЦНИИМОД

Архангельский государственный технический университет

### ДЕФОРМАЦИИ ВЫСОКИХ ДЕРЕВЯННЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ВЛАЖНОСТИ

Экспериментально определены коэффициенты разбухания (усушки) старой древесины, эксплуатирующейся в памятниках деревянного зодчества 85...350 лет, получены зависимости этих коэффициентов от длительности эксплуатации древесины. Установлено, что наибольшая величина деформаций наблюдается при одностороннем намокании сруба.

There have been experimentally determined the swelling (shrinking) factors of the old wood being used for 85...350 years in the monuments of wooden architecture as well as the dependences of these factors on the duration of wood exploitation. It has been stated that the largest strain value is found in wooden framework's getting wet from one side.

Эксплуатация высоких деревянных башнеобразных сооружений в переменных температурно-влажностных условиях способствует возникновению обратимых сезонных и кратковременных деформаций, приводящих к отклонению оси таких строений от вертикали. Эти деформации вызваны неравномерной усушкой или разбуханием древесины. При одновременном использовании в объекте старой и новой древесины величина влажностных деформаций может увеличиваться.

Цель настоящего исследования — определить деформации высоких рубленых сооружений при совместной работе старой и новой древесины, эксплуатирующихся в переменных температурно-влажностных условиях.

Решение поставленной задачи проведено в два этапа. На первом определяли физико-механические свойства длительно работающей древесины, в частности показатели разбухания (усушки). На втором этапе рассчитывали деформацию сруба конкретного сооружения с учетом экспериментальных значений этих показателей.

Для определения коэффициентов разбухания старой древесины были проведены исследования образцов, отобранных из памятников деревянного зодчества северных районов Архангельской области (срок эксплуатации объектов 85...350 лет). Испытано 9 партий по 10...18 образцов в каждой из них в соответствии с ГОСТ 16483.35—80\* и ГОСТ 16483.36—80\*. Образцы имели форму прямоугольной призмы сечением  $20 \times 20$  мм и длиной вдоль волокон 30 мм. Линейные размеры и объем образца определяли в абсолютно сухом состоянии и при влажности, равной или выше предела насыщения клеточных стенок древесины. Образцы вымачивали три недели в дистиллированной воде.

Для сопоставления результатов эксперимента между собой и со стандартными данными полученные коэффициенты разбухания приведены к стандартной плотности  $505 \text{ кг/м}^3$ , что соответствует плотности сосны Кольского полуострова и наиболее близко к среднему значению плотности исследуемой древесины  $506 \text{ кг/м}^3$ .

Полученные результаты показывают, что при разбухании наблюдается медленное, но устойчивое повышение коэффициентов объемного разбухания  $K_V$  и разбухания в радиальном направлении  $K_r$ . Коэффициент разбухания в тангенциальном направлении  $K_t$  аппроксимируется прямой, параллельной оси абсцисс. Экспериментальные зависимости для  $K_r$  и  $K_t$ ,  $K_V$ , % , имеют вид

$$\begin{aligned} K_r &= 0,134248 + 0,000113T; \\ K_t &= 0,309561; \end{aligned} \quad (1)$$

$$K_V = 0,490014 + 0,000076T,$$

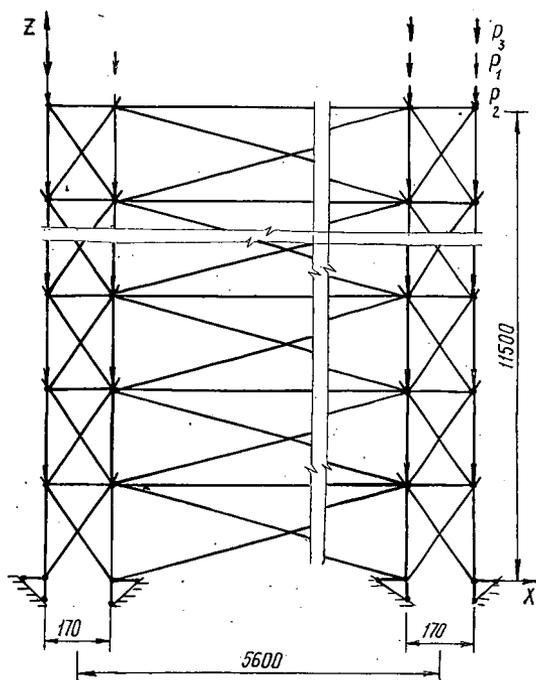
где  $T$  — продолжительность эксплуатации, лет.

Усредненные значения коэффициентов  $K_r$ ,  $K_t$  и  $K_V$  соответственно составляют 0,155; 0,310 и 0,504 % на 1 % изменения влажности, что больше стандартных значений (0,150; 0,270 и 0,440 %) на 3,6; 14,5 и 14,6 %.

Коэффициенты вариации показателей разбухания рассматриваемых выборок для каждого из направлений значительно меньше допускаемых стандартами и при указанной длительности эксплуатации остаются практически постоянными. Среднее значение коэффициента вариации для разбухания в радиальном  $v_r$  и тангенциальном  $v_t$  направлениях, а также для объемного разбухания  $v_V$  составляет соответственно 9,3; 5,5 и 5,4 % при допускаемых 28; 28 и 16 %. Это свидетельствует о малой изменчивости показателей разбухания в рассматриваемый период эксплуатации.

Деформация высоких башнеобразных сооружений рассмотрена на примере колокольни из с. Кушерека Онежского района (Архангельский музей деревянного зодчества). Колокольня представляет собой сруб, перекрытый шатровой кровлей. Высота колокольни до основания креста 24,5 м, высота сруба до основания площадки звона 11,5 м, размеры сруба в плане  $5,6 \times 5,6$  м. Сруб насчитывает 46 венцов, диаметр бревна в среднем 0,3 м.

За расчетную схему (см. рисунок) принято вертикальное сечение сруба шириной 1 м, приведенное в виде плоской стержневой двухветвевой фермы. Бревна во врубке имеют некоторую свободу угловых и вер-



Расчетная схема сруба

тикальных линейных перемещений, поэтому стержни в расчетной схеме соединены шарнирно. Влияние противоположных стен сруба учитывается введением горизонтальных и косых ригелей в каждом ярусе фермы. Каждое бревно сруба приведено к прямоугольнику размером  $0,17 \times 0,25$  м ( $0,17$  м — ширина площадки опирания бревна;  $0,25$  м — высота бревна). Расчетная длина стержней соответственно составляет  $0,17$  и  $0,25$  м. Для сохранения геометрической неизменяемости конструкции в каждой ветви введены раскосы.

В данном исследовании принято, что на сруб действует только постоянная нагрузка от конструкций. Нагрузка от вышележащих конструкций (крыша, ярус звона) приложена в виде сосредоточенных сил  $P_1 = 0,73$  т в верхних узлах фермы. Собственный вес сруба представлен сосредоточенными силами  $P_2 = 0,018$  т в верхних узлах каждого бревна, нагрузка от снега  $P_3 = 0,25$  т приложена в верхних узлах фермы.

В приведенном расчете учтено, что для разных стержней схемы их упругие характеристики различны и зависят от влажности. Расчетные упругие характеристики древесины при стандартной влажности приняты по справочнику\* (табл. 4.7/4), а при влажности  $W$ , отличной от стандартной, пересчитаны по известной формуле

$$E_w = E_{12} (1 - \alpha (W - 12)), \quad (2)$$

где  $\alpha$  — поправочный коэффициент ( $\alpha_r = 0,033$ ,  $\alpha_c = 0,039$ ).

При эксплуатации деревянных конструкций изменение влажности наружного воздуха приводит к усушке и разбуханию древесины. Степень разбухания (усушки) древесины в каждом из направлений ха-

\* Боровиков А. М., Уголев Б. Н. Справочник по древесине. — М.: Лесн. пром-сть, 1989. — 293 с.

рактируется коэффициентом разбухания (усушки)  $K$ , который показывает изменение линейных размеров (в процентах) при изменении влажности на 1 %:

$$K = \frac{\Delta W}{W} = \frac{\Delta l}{l \Delta W} \quad (3)$$

При этом коэффициенты разбухания для свежей и старой древесины различны. Таким образом, каждому стержню расчетной схемы в зависимости от его направления в каждом из вариантов расчета при даются свои значения  $\Delta W$ ,  $E$  и  $K$ .

Напряженно-деформированное состояние конструкции рассчитано на ЭВМ. Плоская задача теории упругости решена методом конечных элементов. За неизвестные перемещения узлов приняты два взаимно перпендикулярных смещения  $x$  и  $z$ , параллельных соответственно осям  $X$  и  $Z$ . Нагрузку в виде сосредоточенных сил прикладывали в узлах.

Результаты расчета деформированного состояния сруба при различных условиях эксплуатации приведены в таблице.

Под воздействием только постоянных нагрузок  $P_1$  и  $P_2$  (схема 1) происходит осадка сруба на 1,6 мм.

При действии на сруб дополнительной снеговой нагрузки  $P_3$  максимальной интенсивности с одной стороны сруба (схема 2) соответствующая ветвь оседает под снеговой нагрузкой на 0,52 мм.

Далее в таблице рассмотрены различные варианты изменения влажностных условий эксплуатации. Предположим, что сруб выполнен полностью из новой древесины и произошло его двухстороннее увлажнение, т. е. влажность древесины внутри сруба составляет 12 %, а снаружи — 30 % (схема 3). В расчет введены значения показателей разбухания новой древесины. В этом случае произойдет равномерное разбухание сруба на 113 мм, при этом наружные верхние точки сруба переместятся вверх на 119 мм.

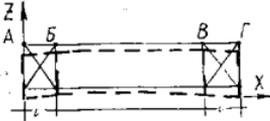
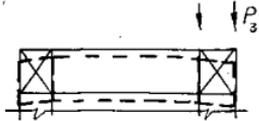
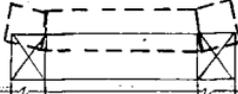
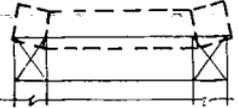
При двухстороннем увлажнении сруба, выполненного полностью из старой древесины (схема 4), произойдет равномерное разбухание соответственно на 121 и 128 мм (несколько больше, чем в схеме 3).

Определим деформации сруба для случая, когда одна ветвь выполнена полностью из новой древесины, а другая — из старой. Увлажнение сруба принято двухсторонним (схема 5). В этом случае вертикальные перемещения ветвей будут аналогичны схемам 3, 4: левая ветвь получит перемещение вверх на 113 мм, правая — на 121 мм. Однако здесь произойдет сдвиг верхнего яруса фермы по горизонтали примерно на 10 мм в сторону ветви из новой древесины, т. е. в сторону меньших показателей разбухания.

Рассмотрим деформации сруба при его одностороннем увлажнении. Предположим, что сруб выполнен полностью из новой древесины (схема 6). В этом случае произойдет разбухание ветви, испытывающей увлажнение, на 113 мм вверх, а крайней наружной точки этой ветви — на 123 мм. Так как другая ветвь и ригели не увлажняются, происходит сдвиг верхнего венца сруба по горизонтали на 126 мм и образуется общий существенный изгиб сруба.

Предположим, что сруб из старой древесины имеет одностороннее увлажнение (схема 7). Картина деформаций здесь будет аналогична предыдущей, но перемещения верхнего венца будут иметь еще большую величину — по горизонтали на 134 мм и по вертикали на 121 и 133 мм соответственно.

Таким образом, показатели разбухания старой и новой древесины существенно различаются. Изменение линейных размеров и объема длительно эксплуатируемой древесины при увлажнении или высыхании

Но- мер схе- мы	Параметры, вводимые в программу	Распреде- ление влажности по срубу, %	Схема деформации верхнего венца сруба
1	$E, P_1, P_2$	12/12/12	
2	$E, P_1, P_2, P_3$	12/12/12	
3	$E, P_1, P_2, K^{нов}$	30/12/30	
4	$E, P_1, P_2, K^{ст}$	30/12/30	

Перемещения точек, мм

А		Б		В		Г	
x	z	x	z	x	z	x	z
-0,01	-1,63	0,00	-1,61	0,00	-1,61	0,01	-1,63
-0,01	-1,63	0,00	-1,61	0,00	-2,14	0,01	-2,15
-2,23	119,34	0,81	112,90	-0,81	112,90	2,23	119,34
-2,51	128,08	0,91	120,89	-0,81	120,89	2,51	128,08

Деформация высококлассных деревянных сооружений...