

интенсивности радиального переноса в приосевой зоне и увеличению его в периферийной. Описанная схема движения потока находится в полном соответствии с наблюдаемой в реальных условиях картиной движения газов (рис. 3). Поэтому расчетные соотношения (20) ... (23) можно рекомендовать для технических расчетов циклонных камер кольцевого сечения.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Вулис Л. А., Устименко Б. П. Об аэродинамике циклонной топочной камеры// Теплоэнергетика.— 1954.— № 9.— С. 3—10. [2]. Деветерикова М. И. Исследование влияния шероховатости внутренних поверхностей и торцевых перетечек на аэродинамику циклонно-вихревых камер: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Л., 1971.— 21 с. [3]. Сабуров Э. Н. Аэродинамика и конвективный теплообмен в циклонных нагревательных устройствах.— Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1982.— 240 с. [4]. Сабуров Э. Н., Осташев С. И. О расчете распределений тангенциальной скорости в циклонной кольцевой камере// Лесн. журн.— 1985.— № 2.— С. 59—64. (Изв. высш. учеб. заведений). [5]. Сабуров Э. Н., Осташев С. И. Об особенностях турбулентного обмена в циклонных кольцевых камерах// Лесн. журн.— 1986.— № 4.— С. 91—96. (Изв. высш. учеб. заведений). [6]. Современное состояние гидродинамики вязкой несжимаемой жидкости/ Под ред. С. М. Гольдштейна. Т. 1.— М.: ИЛ, 1948.— 378 с.

Поступила 15 ноября 1985 г.

УДК 630\*812.71

### ПАРАДОКС СОПРОТИВЛЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ИЗГИБУ

Ю. М. ИВАНОВ

ЦНИИ строительных конструкций

Парадоксом было названо снижение показателя прочности  $\sigma_{вр}$  древесины по превышении некоторой скорости машинного испытания, обратное обычному возрастанию прочности материалов с увеличением скорости роста нагрузки [5]. Отклонение ординат  $\sigma_{вр}$  вниз от прямой  $\lg t (\delta)$ , построенной для более медленного нагружения, было обнаружено при испытаниях стандартных образцов древесины (размерами  $20 \times 20 \times 300$  мм) на изгиб (рис. 1, а) и подтверждено данными испытаний пиломатериала (размер  $50 \times 152$  мм, пролет 3,6 м, рис. 1, б), проведенных в Канаде [10], как описано в работе [5].

Для правильной оценки прочности древесины по результатам машинных испытаний следует выяснить механизм парадокса, имеющего следующие особенности: он проявляется по превышении некоторой скорости нагружения и, следовательно, определенной скорости краевой деформации  $\epsilon_{кр}$ ; с увеличением высоты сечения изгибаемого элемента эта скорость снижается; во влажной древесине (влажность  $w = 30\%$ ) скорость, соответствующая проявлению парадокса, выше, чем в воздушно-сухой древесине ( $w = 15\%$ ) [5].

Учитывая эти особенности, можно предполагать, что в крайних сжатых волокнах сечения элемента с переходом напряжения  $\sigma_a$ , действующего в этих волокнах, через предел вынужденной высокоэластичности древесины  $\sigma_{вэ}$ , т. е. при  $\sigma_a > \sigma_{вэ}$  появляются вынужденные высокоэластические деформации  $\epsilon_{ввэ}$ . При появлении деформаций  $\epsilon_{ввэ}$ , скорость развития которых  $\dot{\epsilon}_{ввэ}$  весьма велика, поскольку экспоненциально растет с напряжением (рис. 2), развитие краевой деформации  $\epsilon_{кр}$  не может следовать за ними, так как определяется при законе плоских сечений деформацией упругого ядра на большей части сечения элемента; в результате создается условие релаксации напряжений  $\dot{\epsilon}_{кр} < \dot{\epsilon}_{ввэ}$ .

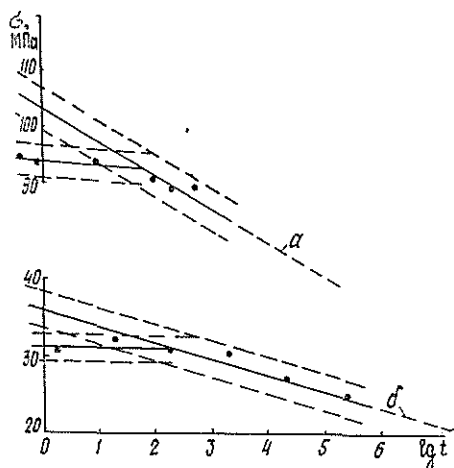


Рис. 1. Результаты испытаний на изгиб с разной скоростью: *a* — стандартных образцов древесины сосны (влажность  $w = 15\%$ ); *b* — пиломатериала тсуги марки 2,  $w \approx 8 \dots 13\%$ .

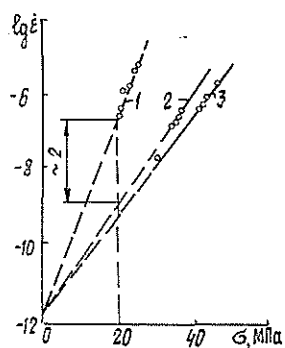


Рис. 2. Определение зависимости  $\lg$  скорости деформации  $\varepsilon_{vvz}$  от напряжения в опытах на сжатие вдоль волокон древесины бука при  $\sigma = \text{const}$ ;  $w = 30$  (1), 12 (2) и 8 % (3);  $\sim 20,7^\circ\text{C}$ .

Под длительной нагрузкой изгибаемые элементы показывают значительное приращение прогибов [7], а следовательно, и краевых деформаций; в этом случае релаксация может получить достаточно полное развитие, т. е. удовлетворяться неравенство  $\sigma_a \leq \sigma_{vz}$ . Подтверждением служит близкое расположение опытных точек к прямой  $\lg t(\sigma)$  длительной прочности древесины при испытаниях на изгиб длительной нагрузкой образцов, имевших разные размеры поперечного сечения. Если же скорость нагружения при машинном испытании сильно растет с соответственным увеличением скорости краевой деформации  $\varepsilon_{кр}$ , то релаксации напряжений в крайних сжатых волокнах не успевает развиться, разность  $\varepsilon_{vvz} - \varepsilon_{кр}$  уменьшается, что ведет к сокращению времени до разрушения с отклонением точки  $\sigma_{вр}$  вниз от прямой  $\lg t(\sigma)$  длительной прочности (рис. 1), т. е. к явлению парадокса.

Следовательно, парадокс проявляется при задержке релаксации напряжений в результате стесненного развития деформаций  $\varepsilon_{vvz}$ . Последние требуют времени для своего развития. Как следствие этого, деформации  $\varepsilon_{vvz}$  под действием ударной нагрузки вообще не успевают развиться, происходит только упругое деформирование, и парадокс не обнаруживается. Здесь наблюдается нечто подобное динамическому (механическому) стеклованию полимера, когда высокая скорость силового воздействия переводит его (без понижения температуры) из области высокоэластического деформирования в область вынужденных высокоэластических деформаций ([6], с. 106, 182). Полимерный композит (древесина) с высокоориентированной компонентой — природной целлюлозой — при больших скоростях механического воздействия (удар) переводится из области нелинейных деформаций  $\varepsilon_{vvz}$  в область линейного упругого деформирования.

С повышением содержания связанной влаги  $w$ , %, скорость  $\varepsilon_{vvz}$  сильно возрастает, например, при увеличении  $w$  с 12 до 30 % и том же напряжении повышается более чем на 2 порядка (при  $\sigma = 20$  МПа и температуре 293 К, рис. 2 [4]). Поэтому во влажной древесине пара-

Таблица 1  
 Отношения  $\sigma_{вр}$  воздушно-сухой и  $\sigma_{вр}$  свежесрубленной (мокрой) древесины при сжатии и изгибе

Порода	Вид испытания	Влажность древесины, %	Число средних значений $\sigma_{вр}$ , $n$	Среднее значение $\sigma_{вр}$ , МПа		Статистические параметры относения $\sigma_{вр}$ в с/вр. мокр			Статистическая оценка разницы $t_{0,05} = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{\sqrt{(S_1^2 + S_2^2)/n}}$	Размер образцов, мм сечение пролет
				$\bar{\sigma}$	$\sigma_{кр}$	$\bar{X}$	$S$	$v, \%$		
Сосна (СССР)	Сжатие	10, 9 (10, 22— 11, 71) 30	18	47,6	—	2,27	0,22	9,9	$\frac{20 \times 20}{240}$ (табл. 1, 2 [8])	
	Изгиб	9, 1 (8, 71— 9, 41) 30	17	—	101,8	1,81	0,13	7,1	$7,5 > 3$	
Хвойные и лиственные (СССР)	Сжатие	15 30	33	45,9	—	1,82	0,20	10,8	$\frac{20 \times 20}{240}$ (табл. 3 [1])	
	Изгиб	15 30	33	—	85,5 59,2	1,44	0,10	7,2	$9,8 > 3$	
Хвойные и лиственные (США)	Сжатие	11, 8 (11, 2— 12, 5) 30	77	47,1	—	2,00	0,29	14,3	$\frac{50 \times 50}{712}$ (табл. 21 [11])	
	Изгиб	11, 8 (11, 2— 12, 5) 30	77	—	86,5	1,70	0,19	11,3	$7,36 > 3$	

Примечание. По данным [1] и [11] каждое среднее значение  $\sigma_{вр}$  соответствует отдельной породе и получено в результате испытаний большого числа образцов.

докс изгиба должен появляться при более высоких скоростях испытания и с меньшим, чем у воздушно-сухой древесины, отклонением  $\sigma_{вр}$  вниз от прямой  $\lg t (\sigma)$ , что и наблюдается на опыте [5]. В результате отношение  $\sigma_{вр}$  воздушно-сухой древесины к  $\sigma_{вр}$  такой же свежесрубленной при изгибе должно быть меньше, чем при сжатии вдоль волокон, т. е. это отношение может количественно доказать данное выше объяснение парадокса.

Такое доказательство дают массовые испытания древесины разных пород в СССР и США (см. табл. 1, здесь  $\bar{X}$  — математическое ожидание,  $S$  — среднее квадратичное отклонение,  $v$  — вариационный коэффициент, %), поскольку величина  $\lg t$  для этих испытаний (см. табл. 2)

Таблица 2

Сравнение условий испытания стандартных образцов древесины пород СССР и США

Показатель	СССР		США	
	Значение показателя для разных видов испытания			
	Сжатие	Изгиб	Сжатие	Изгиб
Размер образцов	20 × 20 мм высота 30 мм	20 × 20 мм $l = 240$ мм	50,8 × 50,8 мм высота $h = 203$ мм	50,8 × 50,8 мм $l = 712$ мм
Число грузов в пролете $l$	—	2	—	1
Скорость испытания	100 МПа · мин <sup>-1</sup>	210 МПа · мин <sup>-1</sup>	0,61 мм · мин <sup>-1</sup>	0,254 мм · мин <sup>-1</sup>
Продолжительность испытания $t_1$ , мин	0,4	0,356	2,46	6,5
Время до разрушения $t$ , с	0,63	0,56	3,87	10,2
$\lg t$	-0,200	-0,252	0,588	1,01

Примечание. Определение продолжительности испытания  $t_1$  в работе [9]: 1) сжатие вдоль волокон при  $w = 12\%$ , ср.  $E \approx 17\,000$  МПа, ср.  $\sigma_{вр} \approx 420$  МПа; 2) изгиб, ср.  $f_m = 16,5$  мм.  $\Delta h = 1,5 \times 0,495 \approx 1,5$  мм — с учетом нелинейности диаграммы  $\varepsilon(\sigma)$ .

находится в диапазоне значений  $\lg t$  проявления парадокса\*: для данных стандартных испытаний в СССР по рис. 1,  $a \ 1,7 > -0,252$ ; для данных США нижняя граница указанного диапазона  $\lg t > 1,7$  (поскольку высота сечения образцов  $50,8 > 20$  мм), т. е. заведомо превышает величину 1,01, приведенную в табл. 2.

Проявлению парадокса, очевидно, обязано меньшее влияние влажности на величину  $\sigma_{вр}$  изгиба сравнительно со сжатием вдоль волокон, обнаруживаемое при скоростных испытаниях пиломатериала. Даваемое иногда этому явлению объяснение меньшим влиянием влажности на сопrotивление древесины растяжению вдоль волокон опровергается тем, что разрушение пиломатериала по сучкам в растянутой зоне фактически всегда происходит от разрыва под углом к волокнам в присучковой зоне, а влияние влажности на этот вид сопrotивления не меньше, чем на прочность при сжатии вдоль волокон.

Приведенные данные подтверждают, таким образом, предложенное объяснение механизма явления парадокса задержкой релаксации напряжений в крайних сжатых волокнах изгибаемого элемента [5].

На основе изложенного можно заключить следующее.

1. При испытаниях образцов древесины кратковременной нагрузкой, служащих для оценки кратковременной и прогнозирования длительной прочности древесины, следует исключать попадание значений  $\lg t$  в их диапазон проявления парадок-

\* Время до разрушения  $t$  определяется по продолжительности  $t_1$  испытания из выражения  $t = \frac{t_1}{2,3(\lg A - \lg t)}$  [5], решаемого последовательными приближениями.

са, для этого нагружение следует производить достаточно медленно.

2. Образец, находившийся достаточно долго под неизменной нагрузкой, но не разрушившийся, будет ослаблен сравнительно с исходным его состоянием вследствие накопления необратимых субмикроскопических повреждений [2]. Если быстро довести его до разрушения на машине, то он должен показать меньшую величину временного сопротивления. На этом основан способ «обрыва» испытаний на растяжение образцов в виде лопатки, т. е. с равномерным распределением напряжений [3]. В случае использования этого приема для изгиба древесины снижение  $\sigma_{вр}$  от накопления субмикрповреждений под длительной нагрузкой складывается со снижением  $\sigma_{вр}$  вследствие парадокса, и отделить влияние одного фактора от другого невозможно.

3. Увеличивающееся с высотой сечения изгибаемого элемента снижение  $\sigma_{вр}$  вследствие парадокса легко спутать с влиянием масштабного фактора, с которым парадокс, однако, ничего общего не имеет, поскольку соответствует разнице в сопротивлении образцов не разных по размерам, а одинаковых, но испытанных с различной скоростью. Таково происхождение коэффициента снижения с высотой сечения несущей способности балок, выведенного в свое время на основании результатов их испытаний кратковременной нагрузкой [12]. Но то, что оправдано в авиационных конструкциях, работающих на скоростные перегрузки, никак не соответствует работе строительных конструкций под действием длительных нагрузок: здесь парадокс полностью отсутствует, и это делает необоснованным применение в нормах проектирования деревянных конструкций коэффициента  $m_6$  снижения расчетной несущей способности клееных балок с высотой их сечения.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Древесина. Показатели физико-механических свойств.— М.: Комитет стандартов СССР, 1962.— 48 с. [2]. Журков С. Н., Куксенко В. С., Петров В. А. Можно ли прогнозировать разрушение// Будущее науки.— М.: Знание, 1983.— Вып. 16.— С. 100—111. [3]. Иванов Ю. М. О точности определения параметров длительной прочности древесины// Лесн. журн.— 1984.— № 4.— С. 62—66. (Изв. высш. учеб. заведений). [4]. Иванов Ю. М. Энергия активации развития у ориентированного жесткоцепного полимера вынужденной эластической деформации// Высокомолекулярные соединения.— 1984.— Т. 26Б.— № 6.— С. 425—430. [5]. Иванов Ю. М., Славик Ю. Ю. Оценка длительной прочности древесины при изгибе по результатам кратковременных испытаний// Лесн. журн.— 1981.— № 2.— С. 66—70. (Изв. высш. учеб. заведений). [6]. Каргин В. А., Слонимский Г. Л. Краткие очерки по физико-химии полимеров.— М.: Химия, 1967.— 232 с. [7]. Леонтьев Н. Л. Длительное сопротивление древесины.— М.; Л.: Гослесбумиздат, 1957.— 132 с. [8]. Мартинец Д. В. Исследование зависимости предела пластического течения от влажности и объемного веса древесины// Тр. Сарат. автодор. ин-та.— 1950.— Сб. 10.— С. 311—333. [9]. Отставнов В. А., Иванов Ю. М. Методология сопоставления относительной безопасности деревянных конструкций, проектируемых по нормам СССР и США// Состояние и перспективы исследований в области деревянных строительных конструкций.— М.: ЦНИИСК, 1983.— С. 23—40. [10]. Madsen B. Duration of load tests for dry lumber in bending// Forest Products Journal.— 1973.— V. 23.— N 2.— P. 21—28. [11]. Markwardt L. J., Wilson T. R. C. Strength a. related properties of woods grown in the United States// Dept. Agr., Techn. Bull. 479, 1935.— 114 pp. [12]. Newlin J. A., Trauer G. W. Form factors of beams subjected to transverse bending only// National Advisory Committee for Aeronautics. Report.— 1924.— N. 181.

Поступила 31 марта 1986 г.