

A.E. Alekseev, V.P. Emelyanov, N.I. Markin
УДК 630.812

В.Н. Курицын, Е.М. Тюленева

Сибирский государственный технологический университет

Курицын Виктор Николаевич родился в 1931 г., окончил в 1954 г. Сибирский лесотехнический институт, кандидат технических наук, профессор кафедры технологии и оборудования лесозаготовок Сибирского государственного технологического университета. Имеет более 100 научных трудов в области резания древесины и технологии лесозаготовок.

Служебный адрес: 660000 г. Красноярск, ул. Мира 82



Тюленева Евгения Михайловна родилась в 1981 г., окончила в 2003 г. Сибирский государственный технологический университет, аспирант кафедры технологии и оборудования лесозаготовок СибГТУ. Имеет около 10 научных работ в области изучения реологических свойств древесины.

Тел.: 89082039350



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ УТОЧНЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДРЕВЕСИНЫ

При проведении экспериментов по сжатию древесины в радиальном направлении выявлено наличие мгновенных необратимых деформаций, находящихся в линейной зависимости от величины приложенной нагрузки. Предложена реологическая модель древесины как упругопластично-эластического тела.

Ключевые слова: древесина, реология, упругость, эластичность, вязкость, пластичность, реологическое уравнение.

Древесина имеет очень сложное анатомическое строение и относится к разряду волокнисто-слоисто-пористых анизотропных материалов. Это обуславливает большую изменчивость ее физико-механических свойств относительно осей симметрии. Причем эти свойства не строго зафиксированы, а зависят от многих внешних факторов, прежде всего от температуры, влажности и времени (процесс естественного старения). Существенно влияет на сопротивляемость древесины внешним физическим нагрузкам не только величина силы, но и скорость ее приложения. При различных скоростях нагружения древесина имеет разную прочность. Это свойство приближает ее к полимерам (практически древесина – естественный полимер), поведение которых под нагрузкой изучает реология.

С точки зрения реологии древесина изучена недостаточно, пока не существует ее точной реологической модели. На основании исследований большинство ученых считают (с достаточной для практики точностью) древесину упругоэластическим материалом, некоторые называют ее упруго-

пластическим телом. Уже одно это говорит об отсутствии единого мнения, так как эластичность и пластичность разные понятия.

Чтобы избежать недоразумений, необходимо четко сформулировать, что понимается под деформативными свойствами материалов.

Упругость – способность тела под действием нагрузки мгновенно деформироваться, а при ее снятии – мгновенно восстанавливать свои размеры. Реологической моделью упругости является тело Гука.

Вязкость – способность тела под действием нагрузки непрерывно деформироваться. При снятии нагрузки деформация прекращается и тело фиксируется в достигнутом состоянии. Реологической моделью вязкости является тело Ньютона.

Эластичность – под действием нагрузки деформации медленно растут во времени, а при ее снятии также медленно полностью восстанавливаются. Реологической моделью эластичности является тело Кельвина (параллельное соединение тел Гука и Ньютона).

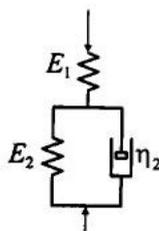
Пластичность – способность тела необратимо деформироваться под действием нагрузки, причем эти деформации не развиваются во времени, а их величина зависит только от величины нагрузки.

Практически все природные материалы под воздействием нагрузки проявляют все эти деформативные свойства, только в разных соотношениях. Одни деформации превалируют, другие могут быть исчезающе малы. Например, стекло, будучи упругим материалом, проявляет вязкие свойства. Но чтобы их заметить, нужны столетия.

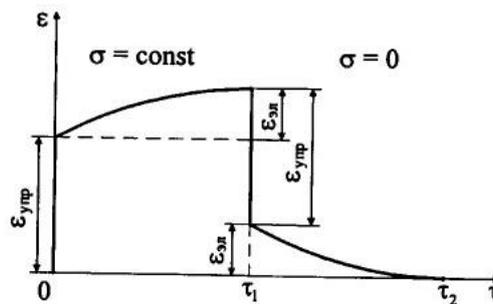
Большинство ученых в настоящее время считает древесину упруго-эластическим телом. Реологической моделью идеального упруго-эластического тела является последовательное соединение тел Гука и Кельвина (рис. 1, а).

Поведение идеального упругоэластического тела под нагрузкой показано на рис. 1, б. При мгновенном приложении внешней нагрузки тело приобретает мгновенную упругую деформацию $\epsilon_{\text{упр}}$. С течением времени τ за счет эластичности деформация тела увеличивается с постепенным приближением к какому-то пределу. При снятии нагрузки тело мгновенно восстанавливает свои упругие деформации, а по истечении такого же периода времени, как при нахождении под нагрузкой, полностью восстанавливаются эла-

сти-
де-
ма-
Тело
вра-
в
ное



а



б

сти-
де-
ма-
Тело
вра-
в
ное

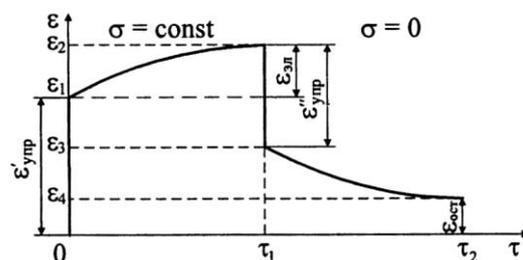
Рис. 1. Зависимость деформации ε идеального упругоэластического тела от нагрузки во времени τ : *a* – схема соединения, *b* – поведение тела под нагрузкой (E_1, E_2 – модули упругости первого и второго рода; η_2 – коэффициент эластичности; σ – напряжение от нагрузки; $\tau_2 = 2\tau_1$)

Однако реальная древесина ведет себя иначе: после снятия нагрузки и временной выдержки деформации не возвращаются в исходное состояние. Чтобы подтвердить это и оценить количественно, нами была проделана серия опытов по сжатию древесины поперек волокон. Этот вид сжатия был выбран из следующих соображений. Во-первых, сжатие поперек волокон из всех видов нагружений наиболее деформативно (например, условный предел прочности древесины сосны при сжатии поперек волокон составляет 3,4 МПа, а вдоль волокон – 41,5 МПа), и реологические процессы более явно проявляются. Во-вторых, этот вид деформации превалирует во всех видах механической обработки древесины. В-третьих, прессование как цельной древесины, так и древесных пластиков происходит в направлении поперек волокон.

Обычно испытания древесины на сжатие поперек волокон производят на стандартных образцах $2 \times 2 \times 3$ см, в нашем эксперименте использованы образцы размером $1 \times 1 \times 1$ см, которые более деформативны и позволяют получить большие напряжения при сравнительно небольших нагрузках.

Испытанию подвергались образцы сосны, ели, лиственницы и березы. Во всех случаях картина выглядит следующим образом (рис. 2).

Рис. 2. Зависимость деформации древесины от нагрузки во времени ($\tau_2 = 2\tau_1$)



После снятия нагрузки и временной выдержки, равной времени нагружения, размеры образца не возвращаются в исходное положение, а на-

блюдаются остаточные деформации $\varepsilon_{\text{ост}}$. Это явление находит объяснение в предположении, что реологические свойства древесины описываются моделью тела Бюргерса. Эта модель отличается от модели упругоэластического тела последовательным добавлением элемента Ньютона, описывающего вязкость. Вязкие деформации определяются по формуле

$$\varepsilon_{\text{в}} = \frac{\sigma \tau}{\eta_1}, \quad (1)$$

где σ – напряжение;

τ – время действия нагрузки;

η_1 – коэффициент вязкости.

Как видно из формулы (1), при бесконечно большом времени воздействия нагрузки будет и бесконечно большая деформация, что в приложении к древесине явный абсурд, поэтому дальнейшее рассмотрение варианта с использованием тела Бюргерса было прекращено [1].

С другой стороны, величина упругой деформации при нагружении $\varepsilon'_{\text{упр}}$ (рис. 2) во всех опытах больше упругой деформации при разгрузке $\varepsilon''_{\text{упр}}$. Следовательно, пока образец находится под нагрузкой, в нем, кроме эластических, развиваются какие-то необратимые деформации. Чтобы определить время их развития, были поставлены специальные опыты с продолжительностью воздействия нагрузки (и последующей разгрузки) от 1 до 7 сут. на образцах из древесины сосны и березы. Всего было проведено 25 экспериментов. В результате было установлено, что величина остаточной деформации не зависит от продолжительности опыта.

Чтобы полностью устранить влияние эластических деформаций, нами был проведен дополнительный эксперимент длительностью нагружения (разгрузки) всего 5 мин. Результат остался тем же: остаточная деформация была такая же, как и при 7-суточном нагружении, т.е. при нагружении в древесине одновременно с упругими возникают мгновенные необратимые деформации. Разница между $\varepsilon'_{\text{упр}}$ и $\varepsilon''_{\text{упр}}$ (рис. 2) и есть мгновенная пластическая деформация.

Была поставлена еще одна серия опытов на образцах древесины сосны с 5-минутным нагружением (разгрузением), но с различной величиной нагрузки: 8, 16, 24, 32 и 40 кг. Наблюдается явно прямолинейная зависимость, которую можно записать в общем виде:

$$\sigma = E_3 \varepsilon_{\text{п}} \quad (2)$$

где: $\varepsilon_{\text{п}}$ – относительная пластическая деформация;

E_3 – коэффициент пропорциональности.

Мы предлагаем назвать E_3 модулем пластической деформации. Его величина зависит от прилагаемого напряжения и в рассматриваемом диапазоне составляет 268 500 кПа.

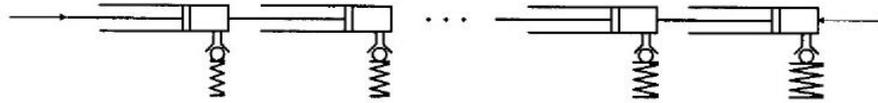


Рис. 3. Механическая модель мгновенной пластичности

Смысловая сторона описываемого явления, на наш взгляд, заключается в следующем. Элементы внутреннего строения древесины не равнопрочны – есть крупные клетки с тонкими стенками, есть маленькие клетки с толстыми стенками, есть огромное количество промежуточных, т.е. у каждого элемента имеется свой предел прочности. При нагружении определенной силой необратимо деформируются те элементы, предел прочности которых равен приложенному напряжению, а остальные продолжают держать нагрузку. С ее увеличением необратимо деформируется еще некоторое количество элементов и так далее, до полного разрушения образца. Для объяснения найденного явления напрашивается аналогия с телом Сен-Венана, с помощью которого иногда описывают внутреннее трение. Но тело Сен-Венана, стронувшись с места под действием силы, продолжает равноускоренное движение, так как коэффициент трения движения меньше коэффициента трения покоя. У нас же наоборот – сдеформировавшись под действием силы, тело фиксируется в этом состоянии, а не продолжает деформироваться.

Более удачна другая механическая модель – бесконечное множество последовательно расположенных гидроцилиндров с шариковыми клапанами, подпертыми пружинами различной жесткости (рис. 3). С приложением внешнего напряжения срабатывают только те клапаны, которые отрегулированы на меньшее давление; жидкость выдавливается из соответствующих цилиндров (т.е. реальное тело деформируется необратимо на некоторую величину). Для последующих деформаций требуется приложение больших напряжений.

Реологические процессы в древесине, на наш взгляд [2–4], происходят следующим образом. При мгновенном нагружении постоянной силой одновременно возникают упругие ε_y и пластические ε_n деформации. С течением времени развиваются эластические ε_s деформации. При снятии нагрузки упругие деформации восстанавливаются быстро, эластические – через какое-то время. Процесс восстановления происходит медленнее, чем при нагружении, поэтому по истечении времени, равного времени нагружения, эластические деформации не успевают полностью восстановиться. Остается еще какая-то величина, которую предлагаем называть запаздывающими эластическими деформациями ε_s .

Суммарная деформация древесины от нагрузки

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_n + \varepsilon_s. \quad (3)$$

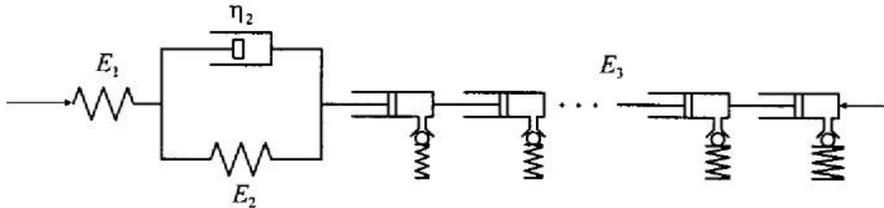


Рис. 4. Реологическая модель древесины

$$\text{Здесь } \varepsilon_3 = \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 \tau}{\eta_2}} \right);$$

E_2 – модуль упругости второго рода;

η_2 – коэффициент эластичности.

Таким образом, реологическое уравнение древесины

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_3} + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 \tau}{\eta_2}} \right). \quad (4)$$

Предлагаемая нами реологическая модель древесины показана на рис. 4.

Следует отметить, что все изложенные выше соображения и выводы справедливы только для сжатия древесины поперек волокон. Имеют ли они общий характер и справедливы ли для других видов нагрузений (изгиб, сжатие вдоль волокон и т.п.) будет исследовано в дальнейшем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курицын, В.Н. О реологической модели древесины. / В.Н. Курицын, Е.М. Тюленева [Текст] // Вестник СибГТУ. – 2004. – №1. – С. 3–6.
2. Курицын, В.Н. Экспериментальное определение модуля упругости второго рода древесины сосны [Текст] / В.Н. Курицын, Е.М. Тюленева // Лесозащита: межвуз. сб. науч. тр. – Красноярск, 2004. – Вып. 5 – С. 214–217.
3. Тюленева, Е.М. Мгновенные остаточные деформации в древесине [Текст] / Е.М. Тюленева, В.Н. Курицын // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения: сб. ст. – Красноярск, 2005. – Т. 2. – С. 231–232.
4. Тюленева, Е.М. Экспериментальное определение модуля упругости первого рода [Текст] / Е.М. Тюленева, В.Н. Курицын // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения: сб. ст. – Красноярск, 2004. – С. 113–114.

Поступила 08.05.07

V.N. Kuritsyn, E.M. Tyuleneva
Siberian State Technological University

Experimental Specification of Rheological Wood Model

The instant irreversible deformations are found to be in linear dependence on the applied load value in the experimentation on wood compression in the radial direction. The rheological wood model is offered as an elasto-plastic and flexible body.

Keywords: wood, rheology, elasticity, flexibility, viscosity, plasticity, rheological equation.