

УТОЧНЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДРЕВЕСИНЫ

Е.М. Тюленева

ГОУ ВПО «Сибирский государственный технологический университет»
660049 Красноярск, пр. Мира, 82

В статье приводится краткий обзор моделей, характеризующих реологические свойства древесины. На основании проведенного автором анализа делается вывод о том, что точной реологической модели древесины пока не существует. Имеющиеся на сегодняшний день реологические модели раскрывают лишь обратимую часть остаточных деформаций. Вопрос о природе остаточных деформаций древесины остается открытым. Известно лишь, что эти остаточные деформации устойчиво сохраняются при длительном выдерживании в условиях постоянной температуры и влажности. Проведенные автором эксперименты по сжатию древесины в радиальном направлении выявили наличие мгновенных необратимых деформаций в условиях постоянной влажности и температуры. Их значение не зависит от времени действия нагрузки, а имеет прямо пропорциональную зависимость от величины прикладываемого напряжения. Для описания пластичности древесины предложена реологическая модель, состоящая из последовательного соединения элементов сухого трения разной прочности, которая характеризует мгновенные необратимые деформации. Предложена более точная реологическая модель древесины как упруго-пластично-эластического тела и реологическое уравнение древесины с учетом мгновенных пластических деформаций.

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

The article represents a brief review of models, characterizing the rheological features of wood. Judging from the analysis the author makes the conclusion that the exact rheological wood model doesn't exist yet. The rheological models that exist nowadays reveal only reversible part of residual deformations. These residual deformations are known to be kept steady while being held under the conditions of constant temperature and humidity. The author conducted the experiments of wood pressure in radial direction and revealed that there were instantaneous irreversible deformations under the conditions of constant humidity and temperature. Their value doesn't depend upon the time period of load operational dependence on the magnitude of tension being put. For description of wood plasticity they offered the rheological model, consisting of successive connection of elements of dry friction of different solidity. This model characterizes instantaneous irreversible deformations. They offered the more exact rheological model of wood being an elastically-plastically flexible solid and the rheological equation of wood taking into account instantaneous plastical deformations.

Key words: wood, rheology, elasticity, flexibility, viscosity, plasticity, rheologic equation

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Реология – наука о законах образования и развития во времени деформаций любых веществ – твердых, жидких, упругих, пластичных и т.п.

В ее теории обычно изучаются не сами деформации, а их модели, т.е. реология использует метод моделирования свойств разнообразных материалов. Теоретические выводы и построения проверяются экспериментально, что позволяет выбрать и улучшить методы моделирования этих свойств.

Ранее, с целью упрощения расчетов деревянных сооружений и конструкций древесину считали упругим телом. Позднее рядом ученых при испытаниях древесины под действием постоянной нагрузки было установлено, что, кроме собственно упругой деформации, появляющейся немедленно после приложения нагрузки, с течением времени развиваются эластические и остаточные деформации. Упругие и эластические деформации составляют обратимую часть общих деформаций, они исчезают после снятия нагрузки. Остаточные деформации сохраняются в древесине после снятия нагрузки при длительной выдержке в среде с постоянной температурой и влажностью (Перельгин, Уголев, 1971). Закономерности развития деформаций древесины устанавливаются на основании реологических

коэффициентов (мгновенного и длительного модулей упругости и т.д.).

Практическая значимость исследований реологических свойств древесины связана с углублением представлений о протекании технологических процессов, прогнозированием и оценкой эксплуатационных характеристик готовой продукции. В последнее время реологические исследования практически распространяются на многие технологические процессы деревообрабатывающей промышленности. В результате некоторые реологические коэффициенты уже нашли свое применение при обосновании внутренних напряжений в процессе сушки материалов, при обосновании режимов резания древесины, в процессе прессования, а также в целлюлозно-бумажной промышленности (размол, при формировании и обезвоживании бумажного полотна, в переработке бумаги) и т.д.

На сегодняшний день в указанных технологических процессах используются совершенно разные реологические уравнения и модели древесины. Это связано со многими факторами. Одна из причин, на наш взгляд, следующая. В реологии выделяют три сплошные среды, а именно: твердое тело Гука, вязкое тело Ньютона и пластическое тело Сен-Венана. Эти простые тела определяют три фундаментальных свойства: упругость, вязкость и пластичность

(Рейнер, 1965). Если при определенных условиях деформирования материал описывается, например, уравнением упругости, то его относят к группе упругих и т.д. Однако многие реальные материалы, в том числе древесина, обладают способностью проявлять несколько свойств одновременно в конкретных условиях деформирования. Различия этих свойств отражаются в определенных пропорциональных соотношениях, т.е. одно свойство может преобладать над другим. Реологическое уравнение, описывающее поведение материала в одних условиях деформирования, может не оправдаться для других условий. Если же уравнение составить с учетом различных режимов деформирования, оно может значительно усложниться. Выбор между более сложным и точным реологическим уравнением и упрощенным, но менее точным определяется для каждого конкретного случая поставленными целями. Как следствие отмечаются некоторые отклонения в расчетах внутри каждого процесса.

В строительстве для вычисления напряжений и деформаций в инженерных сооружениях используются выводы и методы теории упругости, в основе которых лежит представление об упругом линейно деформируемом теле. Однако, многие задачи, имеющие большое значение в практике, еще не решены, так как их точное решение методами теории упругости наталкивается на чрезвычайно сложные препятствия чисто математического порядка.

В сушке древесины применяется модель упруго-эластического тела. В ряде экспериментов Б.Н. Уголевым (Уголев, 1971) были получены значения реологических коэффициентов – мгновенного и длительного модулей упругости, а также периода релаксации. В последующем эти коэффициенты нашли свое применение при обосновании внутренних напряжений в процессе сушки пиломатериалов. Указанная модель отражает поведение тела, деформации которого вполне обратимы. Однако практически во всех источниках, где упоминается эта модель, говорится об остаточных деформациях, сохраняющихся в образцах древесины после разгрузки, которые не восстанавливаются даже после длительной выдержки образцов в условиях постоянной влажности и температуры. Мотивом использования реологической модели, отображающей только обратимую часть деформаций, было облегчение количественного анализа напряженного состояния древесины при сушке. Из-за исключения остаточных деформаций при вычислениях деформирования древесины в условиях переменной влажности и температуры на определенных этапах расчета вводилась поправка, учитывающая их наличие в древесине.

При анализе процесса резания наибольший интерес представляет деформирование сжатием поперек волокон, так как в процессе резания энергия затрачивается в основном на этот вид деформации. В настоящее время реологическая модель в этом технологическом процессе не точно определена. Е.Г. Ивановский (Ивановский, 1974) отмечает, что древесина сложнее модели упруго-эластического тела. По утверждению А.Р. Ржаницына (Ржаницын, 1978), использование аппарата реологии в теории

резания древесины является новым методом механико-математического анализа. При этом возможно принципиально уточнить аналитическое описание силового взаимодействия резца с обрабатываемой заготовкой: учесть влияние важнейшего фактора процесса – скорости резания, поскольку в реологические уравнения входит время деформирования (релаксации).

В процессе прессования с помощью реологии устанавливаются оптимальные параметры воздействия на материал: величина усилий, температура, влажность и др., от которых будет зависеть качество готовой продукции. В этом технологическом процессе используется упруго-вязкая модель (тело Максвелла), впервые предложенная для древесины Ю.М. Ивановым (Иванов, 1959). Причем вязкий элемент этой модели отождествляется со свойством пластичности. Так как эластичность обладает способностью восстанавливать свои свойства с течением времени, в этом технологическом процессе предполагают ее упругое деформирование. Таким образом, в прессовании различают упругие и пластические (остаточные) деформации.

В последующем особенности деформирования древесины Ю.М. Иванов (Иванов, 1959) истолковал с позиции физикохимии полимеров. На основании опытов при сжатии древесины вдоль волокон он установил, что остаточные деформации в древесине после разгрузки есть не что иное, как задержанные (вынужденные) эластические деформации, т.е. по природе обратимые высокоэластические деформации, и при повышении влажности или температуры, они полностью восстанавливаются.

Исследования анатомического строения прессованной древесины, проведенные В.Е. Москалевой (Москалева, 1971) говорят о том, что после распрессовки среза древесины в воде трудно установить существенную разницу между прессованной древесиной и натуральной. Тем не менее, если сжать пальцами кусочек древесины во влажном состоянии по линии запрессовки, чувствуется податливость древесины в этом направлении. По нашему мнению это означает, что в древесине за время нагружения происходят необратимые изменения, описать которые с помощью запаздывающей эластичности было бы неправильным, т.к. эластичность описывает деформацию, которая после разгрузки должна со временем исчезнуть без следа.

Некоторые зарубежные исследователи использовали для описания деформации древесины модель тела Бюргерса, которая включает в себя остаточные деформации древесины в виде последовательного соединения к модели упруго-эластического тела элемента вязкости. Но исследования в этом направлении нами не найдены.

Таким образом, можно утверждать, что точной реологической модели древесины пока не существует. Имеющиеся на сегодняшний день реологические модели раскрывают лишь обратимую часть остаточных деформаций. Вопрос о природе остаточных деформаций древесины остается открытым. Известно лишь, что эти остаточные деформации устойчиво сохраняются при длительном выдержки-

вании в условиях стабильной температуры и влажности. Они исчезают только при одновременном увлажнении и нагревании древесины.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Задачей наших исследований являлось уточнение реологической модели древесины и нахождения ее основных реологических коэффициентов при сжатии ее в радиальном направлении. При изучении реологических свойств древесины применены экспериментальный и теоретический методы исследований.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для экспериментов использовалась древесина сосны, ели, лиственницы и березы, имеющих весьма обширный ареал распространения в Сибири и наиболее часто используемых в производстве.

Испытания древесины, проводились под действием мгновенно приложенного и постоянного на протяжении всего испытания (7 суток) напряжения. По истечении срока нагружения груз снимался и образец оставался в установке для восстановления эластических деформаций на то же время, что и под нагрузкой.

Эксперимент проходил в условиях комнатной температуры 20 ± 2 °С, влажность образцов в среднем составляла 4-5 %, размер – $10 \times 10 \times 10$ мм. При использовании образца сечением 10×10 мм имеются следующие преимущества с образцами других сечений:

- большая однородность древесины в образце;
- наиболее правильное расположение годичных слоев;
- лучшая деформативность;
- меньшие габариты испытательной установки;
- меньший расход древесины при испытаниях.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основании проведенных экспериментов на ползучесть и последующее восстановление деформаций при разгрузке можно отметить ряд важных выводов.

1. Выявлена общая зависимость относительной деформации от времени нахождения образцов под нагрузкой и в разгруженном состоянии (рис. 1).

2. Полученная зависимость имеет общий характер для всех изучаемых нами пород (сосна, ель, береза, лиственница) и направлений сжатия (тангенциальное, радиальное).

3. Во всех образцах после разгрузки имеются остаточные деформации.

4. Упругая деформация в момент разгрузки всегда меньше, чем деформация в момент нагружения. В источниках, где описывается модель тела Бюргерса, а также применяемая к древесине в настоящее время упруго – эластическая модель, это явление не отмечается. Среднее значение превышения составляет около 20 %

5. Восстановление деформаций протекает более

медленным темпом, чем развитие.

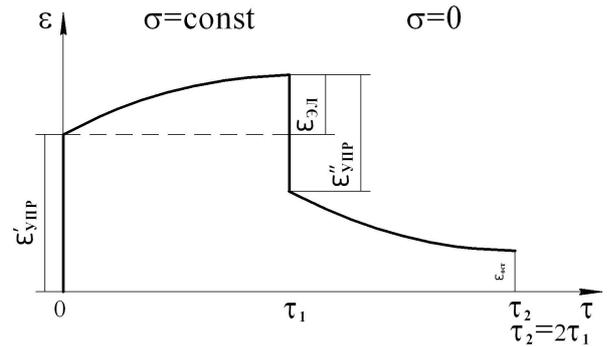


Рисунок 1 – Зависимость величины деформации от времени нахождения образца древесины под нагрузкой и в разгруженном состоянии

Где: σ – напряжение от нагрузки; τ – время; τ_1, τ_2 – время нахождения образца под нагрузкой (7 суток) и в разгруженном состоянии, соответственно; $\epsilon'_{упр}, \epsilon''_{упр}$ – упругие деформации в момент нагружки и в момент снятия нагрузки с образца, соответственно; $\epsilon_{эл}$ – эластические деформации; $\epsilon_{ост}$ – остаточные деформации

Очевидно, гистерезис кривой ползучести и кривой восстановления не является показателем вязкости, так как для элемента Ньютона при воздействии на него постоянного напряжения характерен неограниченный рост деформаций. Во время же нахождения экспериментальных образцов под нагрузкой замечено, что развивающиеся во времени деформации возрастают с постепенно снижающейся скоростью и по истечении семи суток они, достигнув постоянного значения, практически останавливаются. Была выдвинута гипотеза, что за время, пока образец находится под нагрузкой, в нем, кроме мгновенных упругих и возрастающих со временем эластических деформаций, появляются какие-то необратимые, рост которых в определенный промежуток времени останавливается. После снятия нагрузки эти деформации в отличие от упругих и эластических остаются на достигнутом уровне.

С целью выявления закономерности развития их во времени были проведены дополнительные эксперименты продолжительностью нагружения и последующей разгрузки от 1 до 7 суток.

Результат оказался неожиданным. Данные графиков (рис. 2) указывают на наличие в древесине остаточных деформаций даже в тех образцах, которые находились под нагрузкой непродолжительное время, т.е. сутки. Кроме того, величина остаточной деформации оказалась практически постоянной при разном времени протекания экспериментов.

Также превышения деформаций в момент нагружки к упругим деформациям в момент разгрузки (указанный в п.4 выводов) присутствуют во всех образцах, подвергшихся нагружению, и значения этих превышений проходят несколько ниже значений остаточных деформаций.

Видимо, остаточные деформации помимо превышений упругих, содержат в себе некоторую

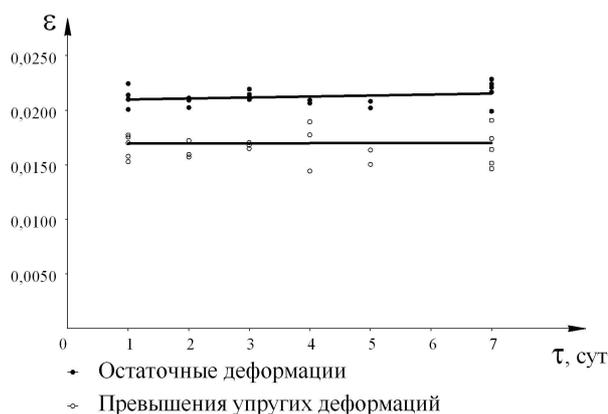


Рисунок 2 – Зависимость остаточных деформаций и превышения упругих деформаций от времени нахождения образцов сосны под нагрузкой

часть обратимых деформаций. На наш взгляд, это связано с тем, что восстановление эластической деформации происходит за счет перехода внутренней энергии упругости в работу, но она задерживается во времени энергией вязкости, которая в свободном состоянии рассеивается, поэтому процесс восстановления эластических деформаций протекает медленнее. Отсюда превышение значений остаточных деформаций над разностью упругих деформаций есть не что иное, как развивающаяся во времени эластическая деформация.

Решено определить зависимость остаточных деформаций от величины приложенной нагрузки. Чтобы снизить влияние эластических деформаций, дополнительная, третья серия экспериментов проводилась длительностью 5 минут в нагруженном состоянии и 5 минут в разгруженном состоянии с различной нагрузкой для каждого образца. Предположительно, что это время позволит максимально снизить влияние эластичности на показатели остаточных деформаций. В результате обнаружено, что значения относительных остаточных деформаций в древесине после выдержки ее в разгруженном состоянии практически не отличаются от значений превышения упругих.

Данная серия опытов дала основание считать, что в древесине при сжатии ее в радиальном направлении, в момент приложения нагрузки, кроме упругих деформаций, независимо от величины действующего напряжения возникают мгновенные, необратимые после разгрузки, деформации. Причем, чем выше напряжение, действующее на образец, тем выше численное значение относительной мгновенной необратимой деформации. Серия опытов показала их явно прямую зависимость (рис. 3).

Поиск элемента или модели, способных описать процессы, происходящие в древесине в области мгновенных необратимых деформаций при сжатии поперек волокон, привел к следующим результатам. Те реологические модели, которые применяются в настоящий момент к древесине (упруго-эластическое тело, упруго-вязкое и др.) включают в себя только два простых элемента – это модель тела Гука и модель Ньютоновской жидкости. Модель

Сен-Венана (описывает свойство пластичности)

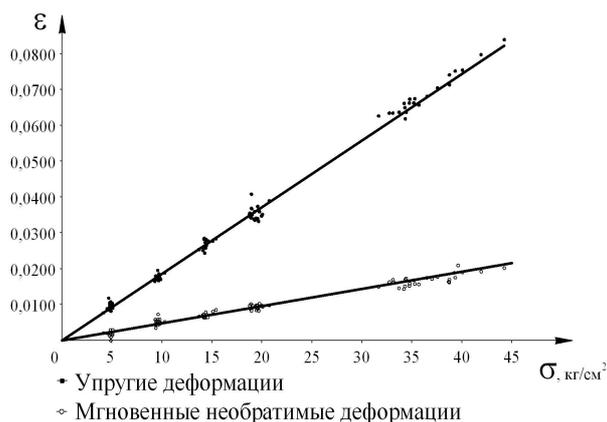


Рисунок 3 – Зависимость упругих и мгновенных необратимых деформаций образцов сосны от величины нагрузки

(Рейнер, 1965) при создании реологических моделей древесины не используется.

Если напряжение, действующее на эту модель Сен-Венана, ниже некоторого предела, для твердых тел - это предел ползучести, то она упруго деформируется. При достижении напряжением предела ползучести возникает пластическая деформация и наблюдается в том случае, когда предел ползучести твердого тела ниже предела его «хрупкой» прочности. За этим пределом начинается разрушение материала.

Элемент сухого трения применительно к древесине должен находиться в каком-то одном состоянии, и при нагрузке должно наблюдаться либо его упругое деформирование, либо пластическое течение, или разрушение.

В нашем случае одновременно наблюдаются все три состояния из-за наличия в древесине клеток разной прочности. Можно предположить, что в области мгновенных остаточных деформаций реологическая модель древесины также должна содержать в себе не один, а несколько элементов сухого трения разной прочности. При нагружении определенной силой необратимо деформируются те элементы, предел прочности которых ниже или равен приложенному напряжению. Более прочные элементы сухого трения, характеризующие в основном плотные слои поздней зоны годичных слоев, при заданной нагрузке будут вести себя упруго, так как величина нагрузки будет ниже их предела ползучести, и после снятия нагрузки полностью восстановятся. С увеличением нагрузки необратимо деформируется еще некоторое количество элементов и так далее до полного разрушения образца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реологическая модель древесины, по нашему мнению, выглядит следующим образом.

При мгновенном нагружении постоянной силой одновременно возникают упругая ϵ_e и пластическая ϵ_n деформации. С течением времени развивается эластическая ϵ_e деформация. После снятия нагрузки мгновенно восстановится упругая деформация. На

восстановление эластической деформации требуется гораздо больше времени, чем на ее образование и развитие. Пластическая деформация в условиях заданной влажности и температуры останется неизменной.

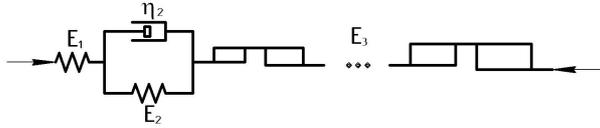


Рисунок 4 – Реологическая модель древесины как упруго-пластично-эластическое тело

С учетом принятой реологической модели древесины суммарная деформация древесины от нагрузки составит

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

где E_1 – мгновенный модуль упругости;

E_3 – коэффициент пропорциональности.

Назовем E_3 модулем пластической деформации. Так как по результатам экспериментов его величина не зависит от величины действующего на образец напряжения;

E_2 – модуль упругости второго рода;

e – основание натурального логарифма;

η_2 – коэффициент эластичности;

τ – время нахождения образца древесины под нагрузкой

Таким образом, предложенная нами реологическая модель не исключает наличие в древесине необратимых деформаций и отображает их в конкретных, реальных условиях деформирования. А предложенное реологическое уравнение позволяет легко определить необходимые реологические показатели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Иванов, Ю.М. Исследования физических свойств древесины / Ю.М. Иванов, В.А. Баженов. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1959. – 54 с.
- Ивановский, Е.Г. Резание древесины / Е.Г. Ивановский. – М.: Лесная промышленность, 1974. – 200 с.
- Москалева, В.Е. Строение древесины и его изменение при физических и механических воздействиях / В.Е. Москалева. – М.: Изд-во Академия наук СССР, 1957.
- Перельгин, Л.М. Древесиноведение: изд. 4-е, доп. и испр. / Л.М. Перельгин, Б.Н. Уголев. – М.: Лесная промышленность, 1971. – 288 с.
- Рейнер, М. Реология [Текст]: пер. с англ. Н.И. Малинина / М. Рейнер. – М.: Изд-во Наука, 1965. – 221 с.
- Ржаницын, А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / А.Р. Ржаницын. – М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.
- Уголев, Б.Н. Деформативность древесины и напряжения при сушке / Б.Н. Уголев. – М.: Лесная промышленность, 1971. – 176 с.

Поступила в редакцию 4 декабря 2007 г.
Принята к печати 16 мая 2008 г.