

ТЕОРИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ

А. С. Согоян

О некоторых закономерностях ползучести древесины

В выполненных до последнего времени экспериментальных работах по исследованию ползучести древесины не было исключено влияние на древесину окружающей среды — температуры и влажности воздуха [1, 2].

Изменения этих двух факторов — температуры и влажности воздуха, несомненно приводят к некоторым колебаниям температур и влажности испытуемого образца, что в свою очередь не может не отразиться на деформации ползучести древесины [2].

С целью проверки некоторых закономерностей деформации ползучести древесины были поставлены специальные опыты на образцах натуральных размеров, в условиях, когда влажность образца в течение всего процесса исследования оставалась постоянной, а температура окружающей среды более или менее одинаковой.

Исследовалось влияние влажности древесины на величину деформации ползучести, в результате чего получены экспериментальные кривые деформации ползучести древесины для образцов с влажностью 15, 30, 50, 95%. Для сохранения этих влажностей образцами в течение всего опыта, были применены специальные меры. В качестве образцов служили балки из древесины тополя сечением 6×12 см и длиной 3,2 м, которые были выпилены из свежесрубленного дерева, чтобы уменьшить влияние трещин на деформации.

Концы балок пропитывались парафином для уменьшения высыхания с торцов, затем образцы плотно обертывались бумагой, края которой заклеивались. Бумага не приклеивалась к древесине, так что оставался маленький зазор между бумагой и древесиной. Затем, поверх бумаги в два слоя, наносился битум растворенный в авиационном бензине, после чего производилось обертывание вторым слоем бумаги и вновь наносился раствор битума в два раза.

Указанная методика изоляции древесины имеет то преимущество, что она не влияет на деформативность образца. В помещении, в котором производились исследования не замечалось больших колебаний температуры воздуха. Температура держалась в пределах $12-15^{\circ}\text{C}$. Таким образом, исследования производились в условиях постоянного режима влажности испытуемой древесины, причем температурный режим был переменным в небольших пределах. Необходимо было, по

мере возможности, уменьшить влияние переменного режима температуры окружающей среды на деформацию ползучести. С этой целью мы приступили к исследованию образцов крупных размеров сечением 6×12 см и 8×16 см, где влияние переменного режима температуры будет сказываться меньше, чем на образцах с малым сечением (1×1 см или 2×2 см). Кроме того образцы натуральных размеров дадут нам более реальные результаты, так как деформация ползучести зависит в некоторой степени от размеров испытуемых образцов [2].

Балки (6×12 см, $l = 3,5$ м), предназначенные для исследования на ползучесть при разных влажностях (15, 30, 50, 95%), предварительно изолировались по вышеуказанной методике. Балки были подобраны с близкими друг к другу значениями предела прочности. Для образцов была взята прямослойная древесина, без сучков. Испытание производилось на чистый изгиб в тангенциальном направлении. Нагрузка прикладывалась через рычаг. Прогобы измерялись в середине пролета, а также под точками приложения нагрузки с помощью индикаторных головок и прогибомеров, с точностью 0,01 мм.

Приборы устанавливались на специальной металлической раме, прикрепленной на штырях к испытуемой балке по ее нейтральной оси в зоне чистого изгиба. Это давало возможность исключить ошибку в измерении за счет возможной осадки опор и смятия древесины в опорах. Таким образом была выбрана такая методика работы, которая сводила бы погрешности испытания к минимуму. Для измерения деформации краевых волокон, на верхнюю и нижнюю плоскости балок устанавливались индикаторы с удлиненными штифтами. База измерения деформации была равна 10 см.

Нагрузки на образцы прикладывались за возможно короткий промежуток времени, а измерение приращения мгновенной деформации производилось тотчас по приложению нагрузки и притом за весьма короткий промежуток времени. Последующие приращения деформации ползучести измерялись через каждые 24 часа в течение 1,5 месяцев.

Было загружено 7 балок при влажностях 15, 30, 50, и 95%, причем балки с влажностью с 15, 30, 95% были по две штуки, выпиленные рядом с одного кряжа, а с влажностью 50% — одна. Балки, выпиленные, с одинаковой влажностью древесины, загружались разными нагрузками с целью установить зависимость деформации ползучести при изгибе от величины постоянной нагрузки.

Напряжение в балках доводилось до $\sigma_1 = 80$ кг/см² и $\sigma_2 = 120$ кг/см².

В табл. 1 приведены значения мгновенных деформаций, полученные в опытах с балками при различной влажности древесины, при напряжениях 80 кг/см² и 120 кг/см².

Как видно из табл. 1, с увеличением влажности деформации возрастают, т. е. модуль упругости уменьшается.

Экспериментальные кривые приращения прогиба во времени при напряжениях $\sigma_1 = 80 \text{ кг/см}^2$ и $\sigma_2 = 120 \text{ кг/см}^2$ и влажностях древесины $w = 15, 30, 50$, и 95% полученные в наших опытах показаны на фиг. 1.

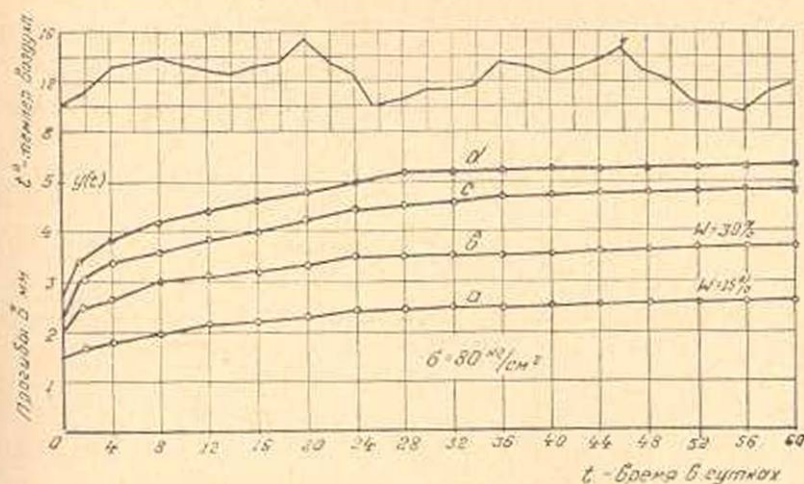
Рассматривая графики (фиг. 1, 2) мы видим, что вслед за мгновенными деформациями происходит нарастание деформации ползучести. Деформации ползучести быстро нарастают в начальный момент, затем нарастание деформации замедляется и происходит постепенное затухание. Величина деформации со временем стремится к некоторой постоянной, т. е. со временем кривые *а, б, в, г*

Таблица 1

Напря- жения кг/см^2	Влажность в $\%$	Мгновенные деформации		
		Прогибы в середине пролета балки в мм	Относитель- ные удлине- ния растяну- тых волокон	Относитель- ные ускоре- ния сжатых волокон
80	15	1,50	0,0058	0,0062
120	15	2,22	0,009	0,0096
80	30	2,06	0,0087	0,0097
120	30	3,05	0,013	0,015
80	50	2,00	0,011	0,012
80	95	2,20	0,0115	0,013
120	95	3,30	0,017	0,0192

становятся параллельными оси абсцисс (фиг. 2).

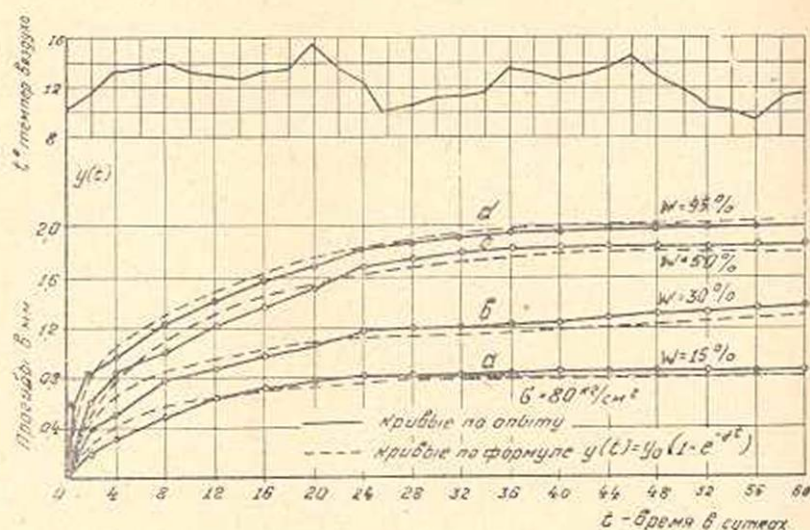
Как показали наши исследования, приращение деформации ползучести в сильной степени зависит от влажности древесины, а именно, повышение влажности вызывает увеличение скорости ползучести,



Фиг. 1.

следовательно и деформации под нагрузкой (фиг. 2).

Из рассматриваемых кривых, изображенных на фиг. 2 видно, что с увеличением влажности древесины величина деформации ползучести и продолжительность ее затухания увеличиваются. Интересно отметить, что значение кривых приращения деформации во времени при влажностях $w = 50\%$ и $w = 95\%$ получились близкие друг к другу,



Фиг. 2.

что дает нам, до некоторой степени, основание думать, что повидимому, начиная с некоторого определенного процента влажности, деформации ползучести древесины, также как и упругие характеристики ее, стабилизируются.

На графиках приращения деформации во времени, нанесены также диаграммы изменения температуры воздуха в помещении экспериментальной установки.

В поставленных опытах, параллельно с измерением прогибов, измерялись также приращения деформации во времени в сжатых и растянутых зонах. Опыт показывает, что деформации ползучести в сжатой и растянутой зонах балки, получились близкие друг к другу.

Используя теорию ползучести Н. Х. Арутюняна [3], можно уравнение полученных кривых ползучести представить в следующем виде:

$$y(t-\tau) = y_0 [1 - e^{-\gamma(t-\tau)}] \quad (1)$$

где y_0 — предельное значение деформации ползучести через бесконечно большой промежуток времени ($t = \infty$);

t — время;

γ — постоянная;

τ — время, соответствующее моменту приложения нагрузки;

e — основание натуральных логарифмов.

В наших кривых начало координат совмещено с моментом приложения нагрузки, т. е. $\tau = 0$, тогда уравнение (1) примет вид:

$$y(t) = y_0 [1 - e^{-\gamma t}]. \quad (2)$$

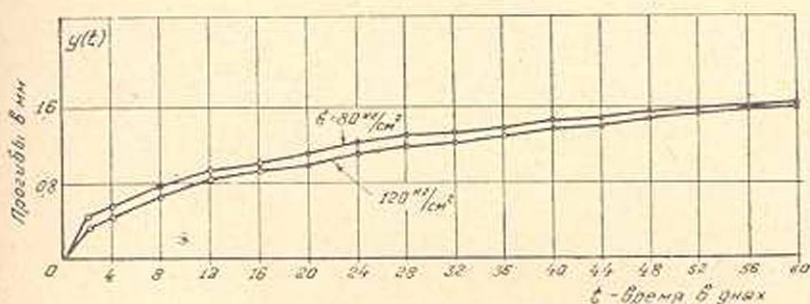
Полученные экспериментальные кривые ползучести дают хорошее совпадение с уравнением (2) (фиг. 2).

Исследование зависимости деформации ползучести от напряжения

В описанных выше опытах одновременно была исследована зависимость деформации ползучести от нагрузки при разных влажностях древесины (15, 30, 50 и 95%).

Загружались по две балки с одинаковой влажностью при различных напряжениях $\sigma_1 = 80 \text{ кг/см}^2$ и $\sigma_2 = 120 \text{ кг/см}^2$.

Соответствующие кривые изменения деформации во времени при указанных напряжениях приведены на фиг. 3. Чтобы ясно представить зависимость деформации ползучести от напряжения, кривые приращения деформации представлены на одном графике, причем ординаты кривой для напряжения $\sigma_1 = 80 \text{ кг/см}^2$ увеличены в соотношении 120/80 (фиг. 3).



Фиг. 3.

Как видно из графиков, точки соответствующие разным напряжениям ($\sigma_1 = 80 \text{ кг/см}^2$ и $\sigma_2 = 120 \text{ кг/см}^2$), нанесенные указанным способом, ложатся близко друг к другу.

В начале кривых мы получили заметное отклонение экспериментальных точек от пропорциональной зависимости, т. е. наблюдается заметный разброс точек при ступенях напряжения $\sigma_1 = 80 \text{ кг/см}^2$ и $\sigma_2 = 120 \text{ кг/см}^2$. Этот разброс экспериментальных точек или разница ординат в начале кривых составляет 4—6%, со временем точки сближаются друг к другу. В середине опыта разность ординат составляет 2—3%, а уже в конце опыта получено наложение точек друг на друга, т. е. конечные значения деформации ползучести на графиках, построенных указанным методом почти совпали.

В опытах с балками при влажностях 15 и 95% результаты исследования деформации ползучести от нагрузки показали более близкое совпадение с линейным законом нежели с балками с 30% влажностью (фиг. 3).

Значение деформации ползучести к концу опыта для балок с различной влажностью при напряжениях $\sigma_1 = 80 \text{ кг/см}^2$ и $\sigma_2 = 120 \text{ кг/см}^2$ показаны в табл. 2.

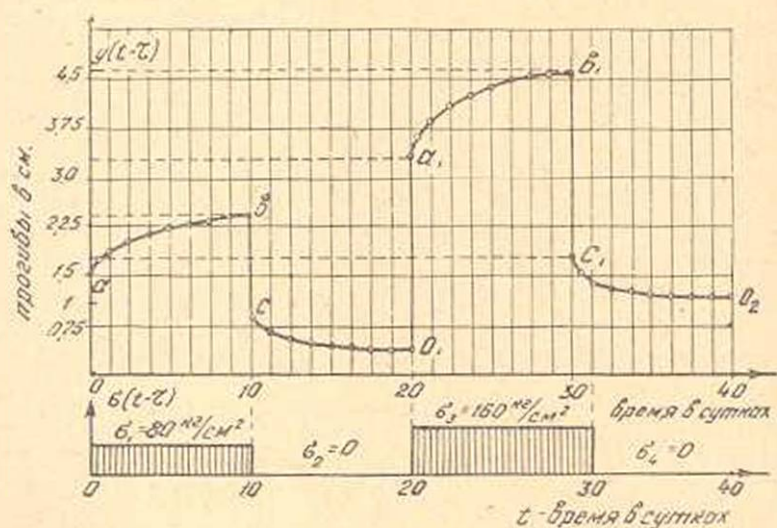
Кроме указанных выше исследований по изучению зависимости деформации ползучести от нагрузки, нами были также поставлены опыты на изгиб над образцами из древесины тополя и сосны (сечение 8×16 см, пролет $l = 4,40$ м) под разные ступени нагрузки. В этих исследованиях, нагрузки, соответствующие напряжениям $\sigma_1 = 80 \text{ кг/см}^2$ и $\sigma_2 = 160 \text{ кг/см}^2$ прикладывались к одной балке. Вначале прикладывалась нагрузка, соответствующая напряжению $\sigma_1 = 80 \text{ кг/см}^2$, под которой образец выдерживался в течение 10 суток. Затем образец разгружался и выдерживался в ненагруженном состоянии для наблюдения за возвращением деформации в течение последующих суток, после чего прикладывалась вторая ступень нагрузки: $\sigma_2 = 160 \text{ кг/см}^2$ (фиг. 4).

Таблица 2

Влажность в %	Деформации ползучести при изгибе к концу опыта в мм	
	при $\sigma_1 = 80 \text{ кг/см}^2$	при $\sigma_2 = 120 \text{ кг/см}^2$
15	0,82	1,60
30	1,37	2,57
50	1,75	—
95	1,95	3,82

Вначале прикладывалась нагрузка, соответствующая напряжению $\sigma_1 = 80 \text{ кг/см}^2$, под которой образец выдерживался в течение 10 суток. Затем образец разгружался и выдерживался в ненагруженном состоянии для наблюдения

за возвращением деформации в течение последующих суток, после чего прикладывалась вторая ступень нагрузки: $\sigma_2 = 160 \text{ кг/см}^2$ (фиг. 4).

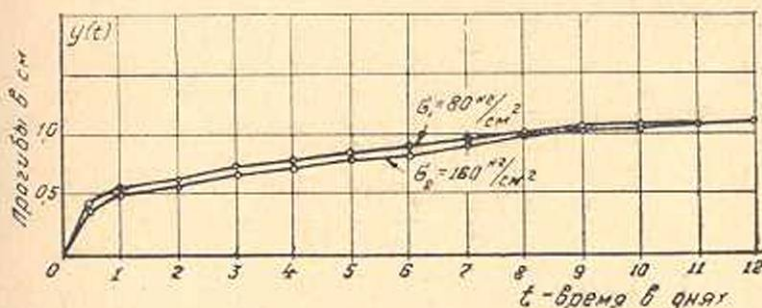


Фиг. 4.

К балкам прикладывались две сосредоточенные силы на расстоянии 1,20 м от опор, т. е. в средней части балки имели чистый изгиб. На совмещенной диаграмме деформации, показана очередность приложения нагрузки ($\sigma_1 = 80 \text{ кг/см}^2$ и $\sigma_2 = 160 \text{ кг/см}^2$) и соответствующие кривые приращения деформации во времени, а также кривые изменения деформации после снятия нагрузки — возврат деформации (фиг. 4).

Деформация oa (фиг. 4) происходит при мгновенном приложении первой ступени нагрузки ($\sigma_1 = 80 \text{ кг/см}^2$). При выдерживании этой ступени происходит нарастание деформации во времени по кривой ab , после разгрузки мгновенная деформация почти полностью исчезает (bc), а часть деформации ползучести постепенно, со временем, возвращается (участок co_1).

Аналогичные виды деформации получаем при приложении второй ступени нагрузки ($\sigma_2 = 160 \text{ кг/см}^2$). Полученные кривые приращения деформации ползучести совмещены в начале координат, причем ординаты кривой для напряжения $\sigma_1 = 80 \text{ кг/см}^2$ увеличены в соотношении $160/80 = 2$ (фиг. 5).



Фиг. 5.

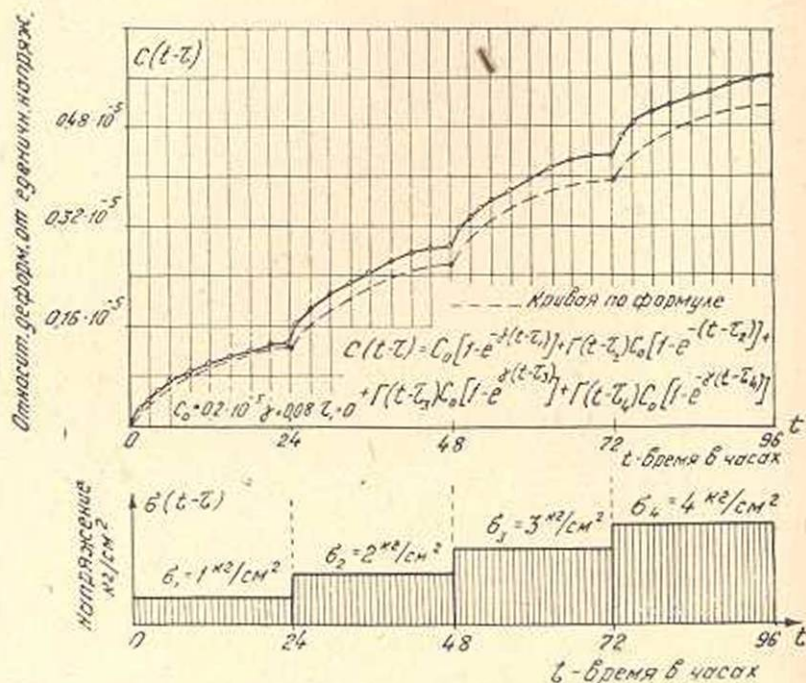
Из графика видно, что экспериментальные точки, соответствующие разным ступеням нагрузки ($\sigma_1 = 80 \text{ кг/см}^2$ и $\sigma_2 = 160 \text{ кг/см}^2$) очень близко располагаются друг к другу. В этих исследованиях мы не получили особенно заметного разброса экспериментальных точек в начале кривых. В середине опыта и в конце, ординаты кривых, соответствующие напряжениям $\sigma_1 = 80 \text{ кг/см}^2$ и $\sigma_2 = 160 \text{ кг/см}^2$ почти совпали (разница $1-2\%$). Таким образом из полученных результатов можно заключить, что в наших опытах, где фактически было исключено влияние окружающей среды, деформации ползучести изменялись прямо пропорционально напряжению, с незначительными отклонениями.

Деформации ползучести при ступенчатом загрузении

С целью проверки принципа наложения деформации ползучести, были поставлены специальные опыты со ступенчатым загрузением. Испытание производилось как при кратковременном, так и при длительном выдерживании образцов под ступенями нагрузки.

Опыты были поставлены по вышеуказанной схеме на чистый изгиб с тополевой и сосновой балками (сочение $8 \times 16 \text{ см}$, $l = 4,40 \text{ м}$). Балки предварительно были изолированы по прежней методике. Нагрузки прикладывались ступенями равного размера с величинами ступени 50 кг/см^2 . Всего было приложено к балкам по 4 ступени нагрузки ($50, 100, 150, 200 \text{ кг/см}^2$). Балки выдерживались под дейст-

вием каждой из этих ступеней в течение 24 часов. Принимая, что деформации ползучести изменяются прямо пропорционально напряжению, построен экспериментальный график изменения деформации ползучести при ступенчатой нагрузке с величиной ступени равной единице, для сжатой зоны при чистом изгибе балки (фиг. 6).



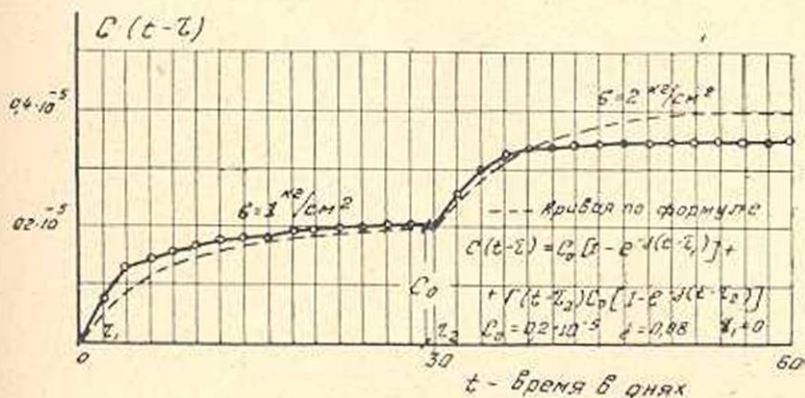
Фиг. 6.

Из графика видно, что прирост деформации ползучести под ступенями нагрузки с увеличением числа ступеней возрастает, так как при выдерживании образца под действием ступени нагрузки $\sigma = 50 \text{ кг/см}^2$ в течение 24 часов, нарастание деформации ползучести не успевает полностью прекратиться и эта незаконченная деформация накладывается на деформацию ползучести новой ступени, что приводит к постепенному увеличению величины деформации под каждой ступенью.

Чтобы, по возможности, исключить наложение неоконченной деформации ползучести от прошлых ступеней нагрузки на деформацию ползучести от новой ступени, необходимо, чтобы образец под действием каждой ступени выдерживался возможно дольше, почти до полного прекращения нарастания деформации. Поэтому были также поставлены опыты с длительным выдерживанием образца под действием двух ступеней нагрузки: $\sigma_1 = 100 \text{ кг/см}^2$ и $\sigma_2 = 200 \text{ кг/см}^2$. Исследование было произведено на балке (сечение $8 \times 10 \text{ см}$, $l = 4,40 \text{ м}$) из древесины сосны. Балка испытывалась, как и ранее, на чистый из-

гиб. Влажность ее была 16%. Балка была изолирована по вышеуказанному методу. Под действием каждой ступени нагрузки образец выдерживался в течение 30 суток и велось наблюдение за приращением деформации. За этот период времени нарастание деформации ползучести под данной ступенью нагрузки почти полностью прекращается.

На базе полученных данных построен график приращения деформации ползучести от единичного напряжения (фиг. 7).



Фиг. 7.

Как видно из графика приращение деформации ползучести под второй ступенью нагрузки получилось на 15–25% меньше, чем под первой ступенью нагрузки (фиг. 7).

Полученные результаты опытов дают, до некоторой степени, основание сделать вывод, что величина деформации ползучести, вызванная некоторым приращением ступени нагрузки зависит от длительности приложения нагрузки данной ступени, а также зависит от длительности действия предшествующих ступеней нагрузок.

Полученные экспериментальные кривые при ступенчатом нагружении показывают, что в данном случае деформации ползучести не растут строго пропорционально нагрузке, наблюдается некоторое отклонение от прямолинейного закона.

Если считать, что форма кривой ползучести древесины под разными ступенями нагрузки не меняется (закон наложения), тогда деформация ползучести, когда она является функцией разности аргументов $(t-\tau)$, при ступенчатой нагрузке с величиной ступени равной единице, к моменту времени t можно представить следующей суммой:

$$C(t-\tau) = C_0[1 - e^{-\gamma(t-\tau_1)}] + \Gamma(t-\tau_2)C_0[1 - e^{-\gamma(t-\tau_2)}] + \Gamma(t-\tau_3)C_0[1 - e^{-\gamma(t-\tau_3)}] + \Gamma(t-\tau_4)C_0[1 - e^{-\gamma(t-\tau_4)}] + \dots \quad (3)$$

где C_0 — предельное значение деформации ползучести при $t = \infty$;

$\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ — моменты приложения нагрузки;

$\Gamma(t - \tau)$ — функциональный прерыватель, т. е. функция, удовлетворяющая условию

$$\Gamma(t - \tau) = \begin{cases} 0 & t < \tau; \\ 1 & t > \tau; \end{cases} \quad (4)$$

$$\tau_1 < \tau_2 < \tau_3 < \tau_4$$

На фиг. 6, 7 пунктиром показаны теоретические кривые, полученные по формуле (3). Расхождение между опытными данными и данными, полученными по формуле (3) составляет 15—25%. Поэтому закон наложения для деформации ползучести древесины можно принять лишь в первом приближении.

В ы в о д ы

На основании проведенных исследований приходим к следующим выводам.

1. Деформации ползучести в сильной степени зависят от влажности древесины, а именно, повышение влажности вызывает увеличение скорости ползучести, а следовательно и увеличение деформации под нагрузкой.

2. В наших опытах, где фактически было исключено влияние окружающей среды, деформации ползучести изменялись пропорционально напряжению (с незначительным отклонением).

3. Полученные результаты опытов при ступенчатом нагружении показывают, что величина деформации ползучести, вызванная приращением нагрузки, зависит от длительности приложения данной ступени нагрузки, а также зависит от длительности действия предшествующих ступеней нагрузок.

Закон наложения для деформации ползучести древесины можно считать справедливым лишь в первом приближении.

Ереванский политехнический институт
им. К. Маркса

Поступило 15 XII 1957

Ս. Ս. Սողոյան

ԲՆԱՓԱՅՏԻ ՍՈՂԷԻ ՄԻ ՔԱՆԻ ՕՐԻՆԱԶԱՓՈՒՅՑՈՒՆՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Խոնավութիւնն ազդեցութիւնը սողքի ղեֆորմացիայի վրա քիչ է տաժնասիրված, իրենից ներկայացնում է որոշակի հետաքրքրութիւն: Բնափայտի սողքի որոշ օրինաչափութիւնների տաժնասիրութիւնն նպատակով դրված են եղել հատուկ փորձեր փայտի բնական չափերի նմուշների վրա: Փորձարկումները տարվել են նմուշի մաքուր ծածան սխեմայով՝ ուժի երկարատև ազդեցութիւնն ղեպդում: Փորձարկման ժամանակ չափվել են ճկվածքները և նմուշի ձգված ու սեղմված թելիկների ղեֆորմացիան: Փորձարկման

ներից ստացված են բնափայտի սողքի ղեֆորմացիայի մի շարք կորեր՝ 15, 30, 50 և 95% խոնավությունների դեպքում, ըստ որում ամբողջ փորձարկման ընթացքում տվյալ խոնավությունը պահպանվել է հաստատուն, իսկ արտաքին չեղմաստիճանը մնացել է քիչ թեև շատ անփոփոխ (գծ. 1 և 2):

Ստացված կորերը լավ են համընկնում հոդվածում բերված (1) բանաձևին և ցույց են տալիս, որ բնափայտի սողքի ղեֆորմացիան անմիջականորեն կախում ունի նրա խոնավության աստիճանից: Խոնավորության մեծացման հետ աճում է սողքի ղեֆորմացիան, ինչպես և ղեֆորմացիայի արագությունը:

Միևնույն ժամանակ ուսումնասիրված է սողքի ղեֆորմացիայի կախումը նմուշի լարումներից՝ տարբեր խոնավությունների դեպքում: Լարումները նմուշում հասցված են եղել $\sigma_1 = 80$ կգ/սմ² և $\sigma_2 = 160$ կգ/սմ² բեռնավորման տարբեր կոմբինացիաների դեպքում, ըստ որում արտաքին պայմանների ազդեցությունը նմուշի վրա չեզոքացված է եղել:

Ստացված կորերը (գծ. 3, 4 և 5) ցույց են տալիս, որ սողքի ղեֆորմացիան ուղիղ համեմատական է լարվածությանը՝ աննշան չեղումներով:

Բնափայտի սողքի ղեֆորմացիայի դեպքում ուժերի անկախության օրենքի ստուգման համար դրված են եղել հասուկ փորձեր: Փորձարկումները տարվել են, ինչպես կարճատև, այնպես էլ երկարատև բեռնավորման պայմաններում, նմուշի տարբեր լարվածությունների համար:

Ստացված փորձնական կորերը (գծ. 6 և 7) ցույց են տալիս, որ սողքի ղեֆորմացիաները աստիճանափոր բեռնավորման դեպքում չեն աճում բեռնավորմանը ճիշտ ուղիղ համեմատական ձևով, այլ կախված են, ինչպես տվյալ բեռնավորման, այնպես էլ նախորդ բեռնավորման երկարատևությունից: Ուժերի անկախության օրենքը այս դեպքում կարելի է ճիշտ համարել միայն առաջին մոտավորությունը:

ЛИТЕРАТУРА

1. Белянкин Ф. П. Длительное сопротивление дерева. М.—Л., ОНТИ, 1934.
2. Иванов Ю. М. Предел пластического течения, Стройиздат, 1948.
3. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести, М.—Л., 1952.