

УДК 674.038.1

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.5.35

ФОРМИРОВАНИЕ СМОЛЯНЫХ КАРМАШКОВ В СТВОЛАХ ДЕРЕВЬЕВ ЛИСТВЕННИЦЫ ДАУРСКОЙ

В.Н. Глухих¹, д-р техн. наук, проф.

А.Ю. Охлопкова², технолог

¹Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,

2-я Красноармейская ул., д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 190005;

e-mail: vnglukhikh@mail.ru

²ООО «Азия Лес», пер. Облачный, д. 78А, офис 11, г. Хабаровск, Россия, 680030;

e-mail: anna.okhlopkova@gmail.com

В статье проанализированы результаты работ отечественных и зарубежных авторов в области напряженно-деформированного состояния древесного ствола и распределения внутренних напряжений в нем. Установлено, что на начальные напряжения, при их дальнейшем изменении в процессе роста деревьев, накладываются циклические напряжения растяжения и сжатия, возникающие при ветровой нагрузке. Древесный ствол, как уравновешенная система и живой организм, стремится компенсировать возникающие нагрузки за счет увеличения плотности стенок клеток, изменения их структуры – скручивания. Возникновение предельных нагрузок и цикличность нагрузок при раскачивании могут приводить к микроповреждениям – трещинам. У хвойных пород образовавшиеся полости заполняются природным антисептиком – смолой. Под воздействием переменных сжимающих и растягивающих напряжений происходит дальнейшее увеличение полостей и заполнение смоляных кармашков. С учетом характера начальных напряжений в радиальном и тангенциальном направлениях кармашки в среднем будут длиннее в зонах наибольших радиальных напряжений растяжения. Целью исследования являлось обоснование местоположения наибольшего скопления смоляных кармашков. Основываясь на том, что форма ствола соответствует форме стержня равного сопротивления, при котором напряжения в наружных волокнах при изгибе должны быть одинаковыми по всей высоте дерева, был произведен расчет окружных и радиальных напряжений по радиусу сечения ствола. При учете взаимосвязи между размером ядровой зоны, напряжениями в центре и по контуру сечения и пределами прочности древесины при статическом изгибе и сжатии для расчета начальных напряжений в стволе древесины лиственницы даурской методами сопротивления материалов применена функция распределения начального продольного напряжения в виде параболоида 14-й степени. В результате получены эпюра суммарного напряжения в стволе, на основе обобщенного закона Гука – график распределения главной относительной деформации в радиальном направлении по диаметру сечения ствола. В качестве подтверждения теории формирования смоляных кармашков проведены лабораторные испытания для определения пределов прочности при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон с учетом соотношения радиусов

Для цитирования: Глухих В.Н., Охлопкова А.Ю. Формирование смоляных кармашков в стволах деревьев лиственницы даурской // Лесн. журн. 2017. № 5. С. 35–52. (Иzv. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.5.35

ядровой и заболонной древесины в образцах. Изучение локализации кармашков по диаметру сечения стволов лиственницы даурской показало, что наибольшее их количество расположено в зоне максимальной радиальной деформации.

Ключевые слова: древесина, ствол дерева, напряженно-деформированное состояние, внутренние и начальные напряжения, напряжения роста, смоляные кармашки, лиственница даурская.

Введение

В процессе роста в объеме дерева возникают напряжения и деформации от действия собственного веса и ветровой нагрузки. Появляющиеся механические напряжения стимулируют развитие клеток древесины таким образом, чтобы обеспечить жизнестойкость ствола. В ответ на образование напряженно-деформированного состояния (НДС) от внешних воздействий и соответствующего развития клеток древесины в противовес первому формируется зеркальное отображение НДС ствола дерева в процессе роста.

Наиболее значимы исследования начальных напряжений роста следующих ученых: А.И. Кузнецова [8], Н. Kübler [14] и А. Ylinen [17]. Некоторые работы посвящены влиянию ветровой нагрузки на формирование ствола дерева [15, 18]. С.В. Белов [2] подготовил обзор опубликованных по этой проблеме материалов и результатов собственных исследований. Он отмечает, что под действием порывов ветра раскачивание дерева приводит к циклическим изменениям напряжений в стволе. По опытным данным период вынужденных колебаний деревьев высотой 18...25 м составляет 4...7 с, частота колебаний – в среднем 12 циклов в минуту. Известно, что слои заболонной древесины в живом состоянии существуют около 30 лет и испытывают за это время от $50,2 \cdot 10^6$ до $90,9 \cdot 10^6$ циклов изменения напряжений.

Живые ткани деревьев способны сопротивляться циклическому изменению напряжений в направлении вдоль волокон без опасности разрушения из-за нарушения усталостной прочности. Это связано не только с высокой прочностью древесины при растяжении и сжатии вдоль волокон, но и с реставрационной способностью клеток в ходе роста [1].

Авторы [8, 14 и др.] отмечают, что образующиеся в процессе роста деревьев начальные напряжения в направлении вдоль волокон являются растягивающими в периферийной зоне ствола и сжимающими в центральной зоне. Эти зоны отличаются друг от друга по цвету: заболонная светлее ядровой. Изменяются и функции древесины этих зон. Проводящей для жидкостей остается заболонная древесина, у которой отверстия пор при растяжении открыты, влажность ее высокая. Ядровая древесина имеет очень низкую проницаемость из-за закрытия мембранами отверстий пор клеток при сжатии.

В зависимости от относительного размера ядровой и заболонной зон различаются и начальные напряжения в этих зонах, а следовательно, плотность и прочность древесины при растяжении и сжатии вдоль волокон, при статическом изгибе и т. д. Физико-механические характеристики зависят от того НДС, которое образуется в стволе в процессе роста дерева.

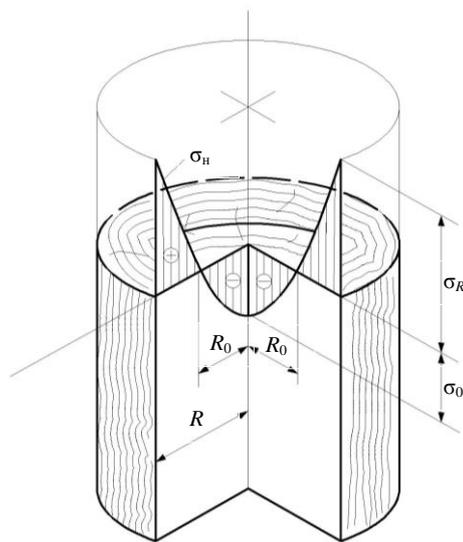
Подтверждением этому можно считать две основные гипотезы, объясняющие образование начальных напряжений в стволе дерева.

Первая гипотеза физически объясняет появление начальных напряжений. По данным исследований С.Г. Лехницкого [11] и В.Н. Глухих [3], напряжения, появляющиеся от собственного веса ствола, кроны и атмосферных осадков, распределены по сечениям неравномерно: в центральной зоне оси их несколько больше, чем в периферийной. Эти механические напряжения стимулируют приток питательных веществ в наиболее напряженную зону, в которой сопротивление сжатию (либо растяжению) за счет увеличения толщины стенок клеток древесины возрастает, вызывая появление в другой зоне напряжений противоположного знака. Одновременно с этим растет и плотность древесины.

Вторая гипотеза имеет физико-химическую основу. При повышении влажности древесины появляется наклон фибрилл в стенках клеток, волокна приобретают форму спирали. Чем выше влажность, тем больше угол наклона фибрилл к продольной оси клетки. При этом поперечный размер фибрилл увеличивается, продольный – сокращается. В заболонной зоне с повышением влажности размер клеток по длине из-за наклона фибрилл сокращается, вызывая сжатие в ядровой зоне. При этом волокна заболони подвергаются растяжению.

Справедливость последней гипотезы иллюстрируют известные исследования Н. Kübler [14], которые экспериментально подтверждают наличие начальных растягивающих напряжений вдоль волокон в периферийной зоне и сжимающих в центральной зоне сечения ствола дерева (рис. 1).

Рис.1. Распределение начальных напряжений по сечению ствола дерева: R – радиус ствола дерева; R_0 – радиус ядровой древесины; σ_n – начальное напряжение; σ_R и σ_0 – значение начального напряжения в точках, расположенных в центре и на контуре сечения



Радиальное напряжение в поперечных сечениях является растягивающим, а окружное в периферийной зоне – сжимающим, в центральной – растягивающим. Начальное напряжение напоминает зеркальное отображение напряжения от раздражителя. В первом случае им является напряжение

от ветровой нагрузки, причем предельным это напряжение будет при критической скорости ветра, во втором – напряжение из-за наклона фибрилл, связанного с влажностью древесины. В совокупности эти два фактора способствуют формированию прочности древесины при сжатии и растяжении вдоль волокон и при статическом изгибе.

Весьма существенным обстоятельством является циклическая перемена знака и величина начального напряжения при ветровой нагрузке из-за раскачивания дерева. При этом на всем протяжении действия ветровой нагрузки в стволе дерева происходит изменение НДС. Напряжения в радиальном и тангенциальном направлениях при раскачивании дерева изменяются не только по величине, но и по знаку.

Механизм образования кармашков и смоловыделения изучен недостаточно. Л.А. Иванов [7] считает, что причиной смоловыделения является секреторное давление, возникающее при участии электрических сил, а выдавливание смолы происходит за счет действия осмотического давления эпителия.

А.И. Кузнецов [8] предполагает, что в процессе смоловыделения участвуют внутренние, а не продольные напряжения в поперечных сечениях, являющиеся причиной ядрообразования. Тангенциальные внутренние силы сжатия в поперечной зоне заболонной древесины вполне могут вызывать давление и способствовать появлению перемещения смолы по горизонтальным и вертикальным смоляным каналам. При понижении окружных напряжений от заболони к центру сечения уменьшается и давление в смоляных ходах. В ядровой зоне, где окружные напряжения меняют свой знак и становятся растягивающими, создается понижение давления в смоляных ходах, истечение живицы прекращается. Он отмечает, что в креновой древесине при интенсивном сжатии вдоль волокон напряжения растяжения в поперечных сечениях не способствуют выделению живицы из смоляных ходов. Креновая древесина всегда имеет значительно меньшее количество смоляных ходов по сравнению с древесиной противоположной стороны ствола.

Отмеченное выше свидетельствует о том, что напряжения в древесине участвуют в образовании смоляных кармашков в процессе роста дерева.

Это же косвенно подтверждают и практические наблюдения при подсочке леса. Истечение живицы возрастает или уменьшается в зависимости от влажности воздуха. С повышением влажности воздуха, как отмечает А.И. Кузнецов [8], тангенциальные напряжения из-за набухания древесины увеличиваются, а при снижении влажности воздуха из-за усушки древесины – уменьшаются. Это предположение, на наш взгляд, не имеет под собой основания, поскольку влажность растущего дерева не может быть ниже предела гигроскопичности, а следовательно, разбухание или усушка древесины просто отсутствуют. Здесь речь может идти об изменении веса кроны и ствола дерева за счет появления свободной влаги из атмосферных осадков и конденсата из воздуха на поверхности ствола, сучьев, коры, листьев или хвои. Такое повышение влажности приведет к увеличению напряжений в стволе дерева от действия ветровой нагрузки, в сухом периоде эти напряжения уменьшаются.

В совокупности из-за действия начальных напряжений и напряжений от ветровой нагрузки, циклически изменяющихся при раскачивании дерева, в некоторых зонах ствола создаются условия для образования локального разрушения с появлением микрополостей, заполняющихся смолой. Из-за циклически изменяющегося давления смолы в кармашке при раскачивании дерева происходит дальнейшее развитие полости за счет воздействия гидравлического клина. Наши наблюдения подтверждают, что по объему ствола дерева кармашки распространяются неравномерно. Наибольшее их количество образуется в тех местах, где напряжения и деформации достигают максимальных значений.

На основании изложенного выше можно сделать вывод, что исследованиям распространения кармашков по стволу дерева должно предшествовать изучение изменения начальных напряжений и напряжений от действия ветровой нагрузки по радиусу сечения и длине ствола.

Объекты и методы исследования

При рассмотрении вопроса образования и развития смоляных кармашков в первую очередь необходимо установить причины их появления, а уже затем исследовать динамику развития.

Кармашек представляет собой полость, заполненную смолой и расположенную в объеме ствола дерева [6]. По предварительным результатам полевых исследований, проведенных параллельно с [12], кармашки располагаются по поперечному сечению ствола неравномерно. В эксперименте участвовало две пласти 54 сердцевинных вырезок, всего зафиксирован 501 кармашек. Большинство из них расположено в непосредственной близости от камбиального слоя. В пределах заболони их количество составляет 68,0 %, на расстоянии 2...4 см от поверхности – 19,3 %. При продвижении вглубь ствола количество кармашков уменьшается и в центральной зоне составляет доли процента. По нашим данным, наибольшее их количество приходится на зону 0,80...0,92 от радиуса сечения ствола дерева.

Образование полости в объеме ствола связано с нарушением целостности массива древесины в локальной области. Причиной нарушения целостности может служить возникновение максимальных напряжений и деформаций в этой области [16]. При этом речь идет о напряжении (деформации) растяжения в радиальном направлении в точке, в которой они по каким-либо причинам достигли предельных значений.

Вначале происходит микроповреждение древесины, возможно усталостного характера, на что она откликается выделением смолы, заполняющей микропустоту (полость). При раскачивании дерева под воздействием ветровой нагрузки радиальное напряжение (деформация) в точке изменяется как по величине, так и по знаку. Как только возникает деформация сжатия в радиальном направлении, давление смолы в кармашке возрастает и она, подобно гидравлическому клину, раздвигает волокна в направлении наименьшего сопротивления, увеличивая объем полости. Отсюда следует, что размер длины кармашков будет самым большим в той части ствола, где фиксируется наибольшее радиальное напряжение сжатия.

В процессе роста в стволе дерева формируются начальные напряжения. По данным А.И. Кузнецова [8], Н. Kübler [14] и других ученых, в продольном направлении напряжения в ядровой зоне являются сжимающими, в заболонной – растягивающими. При изгибе от ветровой нагрузки в стволе появляются дополнительные напряжения, суммирующиеся с начальными. По нашему мнению (рис. 2), в части сечения ствола с подветренной стороны должны действовать только сжимающие напряжения, за исключением точки на поверхности ствола, где напряжение в крайнем случае должно быть равно нулю, в противном случае будет инициирован процесс развития клеток, который в перспективе приведет к смене знаков напряжений в центральной и периферийной зонах, что негативно повлияет на устойчивость дерева.

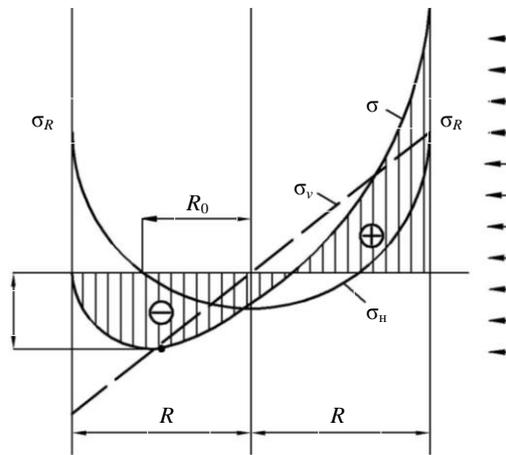


Рис. 2. Распределение начальных, от ветровой нагрузки и суммарного напряжений в плоскости действия ветровой нагрузки (предположение авторов): σ и σ_v – внутренние напряжения от ветровой нагрузки и суммарное

Согласно предположению Н. Kübler [14], при определенной силе ветра во всех точках части сечения с подветренной стороны будут действовать значительные сжимающие напряжения (рис. 3, а), вызывающие опасность появления складок смятия.

В одном можно согласиться с А.И. Кузнецовым и Н. Kübler, что напряжения в продольном направлении значительно больше по величине радиальных и окружных напряжений в поперечных сечениях (рис. 3, б). Оба автора в своих исследованиях отмечают, что начальное радиальное напряжение, сформировавшееся в процессе роста дерева, является растягивающим и относительно небольшим по величине. Начальное напряжение в тангенциальном направлении в центральной зоне является также растягивающим, а в периферийной зоне сжимающим и тоже небольшим по величине.

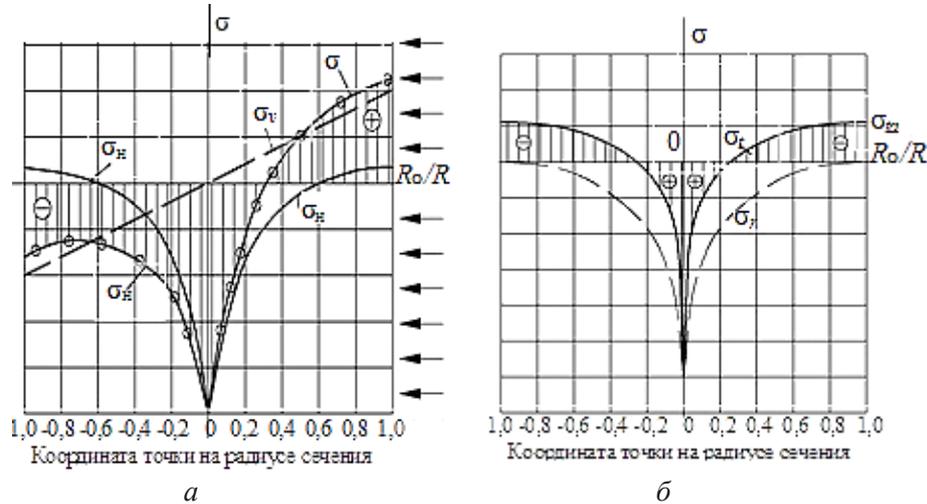


Рис. 3. Распределение начальных напряжений в продольных (а) и поперечных (б) сечениях ствола дерева (Н. Kübler)

Таким образом, в работах Н. Kübler [14], С.Г. Лехницкого [11] и В.Н. Глухих [5] доказано, что в любой точке ствола дерева имеет место объемное напряженное состояние, для расчета которого можно использовать обобщенный закон Гука [3]:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\sigma_r}{E_r} - \mu_{rt} \frac{\sigma_t}{E_t} - \mu_{ra} \frac{\sigma_a}{E_a}; \\ \varepsilon_t &= -\mu_{tr} \frac{\sigma_r}{E_r} + \frac{\sigma_t}{E_t} - \mu_{ta} \frac{\sigma_a}{E_a}; \\ \varepsilon_a &= -\mu_{ar} \frac{\sigma_r}{E_r} - \mu_{at} \frac{\sigma_t}{E_t} + \frac{\sigma_a}{E_a}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

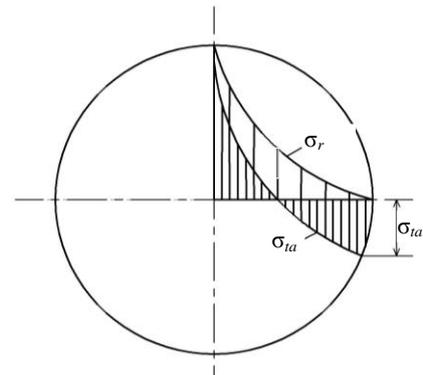
где $\varepsilon_r, \varepsilon_t, \varepsilon_a$ – главные относительные деформации;
 $\sigma_r, \sigma_t, \sigma_a$ – напряжения в главных направлениях анизотропии;
 E_r, E_t, E_a – модули упругости древесины в главных направлениях анизотропии;
 $\mu_{rt}, \mu_{ra}, \mu_{tr}, \mu_{ta}, \mu_{ar}, \mu_{at}$ – коэффициенты поперечной деформации (коэффициенты Пуассона).

Напряженное состояние дерева формируется в процессе роста так, чтобы ствол обладал прочностью и устойчивостью под действием собственного веса, ветровой и снеговой нагрузок. При этом размеры сечений по высоте ствола формируются таким образом, чтобы появляющиеся напряжения не вызвали остаточных деформаций. Ствол дерева должен противостоять порывам ветра с минимальными затратами материала на свою конструкцию [2].

Этому соответствует форма стержня равного сопротивления, в которой напряжения в наружных волокнах при изгибе должны быть одинаковыми по всей высоте ствола. А.И. Кузнецов [8] считает, что нормальный ствол в нижней своей части может быть в форме параболоида, в верхней части – усеченного или правильного конуса.

Принимая в первом приближении форму ствола в виде конического стержня и основываясь на решении задачи его растяжения С.Г. Лехницким [11] методами теории упругости анизотропного тела, В.Н. Глухих [3] уточнил решение задачи напряжений при сжатии конического стержня силами собственного веса (рис. 4).

Рис. 4. Распределение окружных и радиальных начальных напряжений по радиусу сечения ствола дерева (Н. Kübler)



Экспериментальные и теоретические исследования начальных напряжений в стволах деревьев, проведенные разными авторами, подтверждают, что такие напряжения образуются и развиваются в процессе роста дерева и достигают в наиболее напряженных частях ствола предельных значений. В выпиливаемых из такого пиловочника пиломатериалах начальные напряжения, образовавшиеся в дереве в процессе его роста, остаются и достигают четверти своего предельного значения [8].

Н. Kübler [14] предложил логарифмические функции, описывающие изменение начальных напряжений в поперечных и продольном направлениях и позволяющие математически охарактеризовать появление напряжений растяжения (в продольном направлении в периферийной зоне) и сжатия (в центральной зоне сечения).

Исследованиями В.Н. Глухих и А.Л. Акопян [4] установлено, что функции напряжений Н. Kübler [14] могут быть использованы для стволов деревьев, у которых прочность древесины при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон одинакова. По данным многочисленных экспериментальных исследований отечественных и зарубежных ученых [9, 10, 13], прочность древесины известных пород при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон неодинакова и в среднем различается в 2 раза и более.

В.Н. Глухих и А.Л. Акопян [4] подтверждают, что размер ядровой зоны сечения, напряжения в центре и на контуре сечения в направлении вдоль

волокон, пределы прочности древесины при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон взаимосвязаны.

Учитывая размеры ядровой и заболонной зон сечения стволов лиственницы даурской, составляющие на основании наших исследований в среднем $0,85R$ (где R – радиус исследуемого сечения ствола), можно принять функцию распределения начального продольного напряжения в виде параболоида 14-й степени:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_R - \sigma_0}{R^{14}} r^{14} + \sigma_0, \quad (2)$$

где σ_n – начальное напряжение в сечении ствола в точке с координатой r ;
 σ_R, σ_0 – начальное напряжение в направлении вдоль волокон древесины на периферии и в центре сечения ствола (рис. 5).

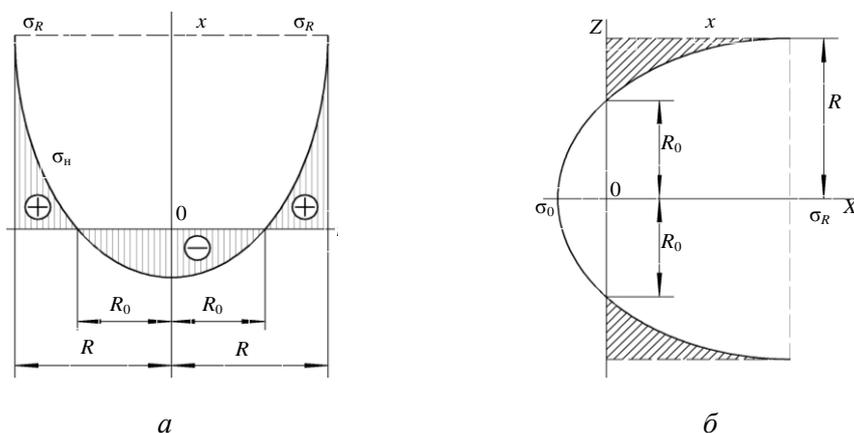


Рис. 5. Распределение начальных напряжений по сечению ствола дерева: *а* – в осесимметричной задаче; *б* – в плоскости действия ветровой нагрузки

Представим уравнение (2) в общем виде:

$$x = kz^{14} + b_0, \quad (3)$$

где $k = \frac{\sigma_R - \sigma_0}{R^{14}}$;

$$b_0 = \sigma_0.$$

Определим равнодействующие на участках эпюры начальных напряжений как объемы тел вращения образующей параболоида (рис. 5, б) вокруг оси X :

$$V = \pi \int z^2 dx. \quad (4)$$

Получим из (3) выражение в общем виде:

$$z^2 = \sqrt[7]{\frac{x - b_0}{k}}. \quad (5)$$

Найдем объемы нижней части параболоида (рис. 5, а) и заштрихованного тела вращения (рис. 5, б):

$$V_{\text{ни}} = \pi \int_{-\sigma_0}^0 \sqrt[7]{\frac{x-b_0}{k}} dx = \frac{7\pi}{8\sqrt[7]{k}} (x-b_0)^{8/7} \Big|_{-\sigma_0}^0 = \frac{7\pi}{8\sqrt[7]{k}} [-b^{8/7}] = -\frac{7\pi R^2}{8\sqrt[7]{\sigma_R - \sigma_0}} \sigma^{8/7}; \quad (6)$$

$$V_3 = \pi R^2 \sigma_R - \pi \int_0^{\sigma_R} \sqrt[7]{\frac{x-b_0}{k}} dx = \pi R^2 \sigma_R - \frac{7\pi R^2}{8\sqrt[7]{\sigma_R - \sigma_0}} \times \\ \times [b_0^{8/7} - (\sigma_R - \sigma_0)^{8/7}] = \pi R^2 \sigma_R + \frac{7\pi R^2}{8\sqrt[7]{\sigma_R - \sigma_0}} \sigma_0^{8/7} - \frac{7}{8} \pi R^2 (\sigma_R - \sigma_0). \quad (7)$$

Поскольку

$$\sum X = V_{\text{ни}} - V_3 = -\frac{7\pi R^2}{8\sqrt[7]{\sigma_R - \sigma_0}} \sigma_0^{8/7} + \pi R^2 \sigma_R + \frac{7\pi R^2}{8\sqrt[7]{\sigma_R - \sigma_0}} \sigma_0^{8/7} - \\ - \frac{7}{8} \pi R^2 (\sigma_R - \sigma_0), \quad (8)$$

из уравнения равновесия $\sum X = 0$:

$$\pi R^2 \sigma_R - \frac{7}{8} \pi R^2 (\sigma_R - \sigma_0) = 0. \quad (9)$$

Из (9) получим соотношение напряжений в направлении вдоль волокон в центральной и периферийной зонах сечения:

$$\sigma_R = -7\sigma_0. \quad (10)$$

Радиус ядровой зоны находим, приравняв к нулю начальное напряжение:

$$\sigma_{\text{н}} = \frac{\sigma_R - \sigma_0}{R^{14}} R_0^{14} + \sigma_0 = 0, \quad (11)$$

откуда

$$R_0 = \sqrt[14]{\frac{R^{14}(-\sigma_0)}{-7\sigma_0 - \sigma_0}} = \frac{R}{\sqrt[14]{8}} = \pm 0,862R.$$

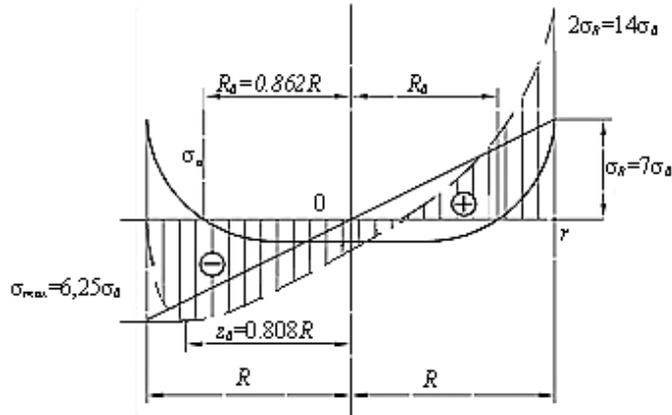
Представим суммарное напряжение вдоль волокон с учетом ветровой нагрузки (рис. 6):

$$\sigma = -8 \frac{\sigma_0}{R^{14}} (z^2 + y^2)^7 + \sigma_0 + \frac{\sigma_R}{R} z = -8 \frac{\sigma_0}{R^{14}} (z^2 + y^2)^7 + \sigma_0 - 7 \frac{\sigma_0}{R} z. \quad (12)$$

Исследуем функцию суммарного напряжения на экстремум (в плоскости ветровой нагрузки):

$$\frac{d\sigma}{dz} = -112 \frac{\sigma_0}{R^{14}} z^{13} - 7 \frac{\sigma_0}{R} = 0; \quad (13) \\ z_0 = \sqrt[13]{-\frac{7R^{13}}{112}} = -\frac{R}{\sqrt[13]{16}} = -0,808R.$$

Рис. 6. Эпюры суммарного напряжения с учетом ветровой нагрузки в стволе лиственницы даурской: z_0 – координата экстремума суммы напряжений; σ_{\max} – максимальное напряжение



Максимальное напряжение в сжатой зоне

$$\sigma_{\max} = -8 \frac{\sigma_0}{R^{14}} (0,808R)^{14} + \sigma_0 + 7 \frac{\sigma_0}{R} 0,808R = 6,2516\sigma_0. \quad (14)$$

Предел прочности при сжатии вдоль волокон:

$$\sigma_{\text{вс}} = 6,2516\sigma_0; \quad (15)$$

при статическом изгибе

$$\sigma_{\text{ви}} = 14\sigma_0. \quad (16)$$

Отношение пределов прочности при сжатии вдоль волокон и статическом изгибе:

$$\frac{\sigma_{\text{ви}}}{\sigma_{\text{вс}}} = \frac{14\sigma_0}{6,2516\sigma_0} = 2,24. \quad (17)$$

Для вычисления главной относительной деформации в радиальном направлении обратимся к работе [17], где начальные окружные и радиальные напряжения описаны логарифмическими функциями:

$$\sigma_t = \sigma_{\text{та}} \left(1 + \ln \frac{r}{R} \right); \quad (18)$$

$$\sigma_r = \sigma_{\text{та}} \ln \frac{r}{R}, \quad (19)$$

которые можно использовать для некоторого упрощения задачи напряжений.

Функцию напряжения вдоль волокон, развивающегося в процессе роста дерева, необходимо принять с учетом размеров ядровой и заболонной зон по результатам авторских исследований применительно к древесине лиственницы даурской:

$$\sigma = -8 \frac{\sigma_0}{R^{14}} (z^2 + y^2)^7 + \sigma_0 - 7 \frac{\sigma_0}{R} z. \quad (20)$$

Для установления причины возникновения внутренних пустот определим главную относительную деформацию в радиальном направлении на основании обобщенного закона Гука:

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_r}{E_r} - \mu_{rt} \frac{\sigma_t}{E_t} - \mu_{ra} \frac{\sigma_a}{E_a} = \frac{\sigma_{ta}}{E_r} \ln \frac{r}{R} - \mu_{tr} \frac{\sigma_{ta}}{E_t} \left(1 + \ln \frac{r}{R} \right) - \frac{\mu_{ar}}{E_a} \left(-8 \frac{\sigma_0}{R^{14}} z^{14} + \sigma_0 - 7 \frac{\sigma_0}{R} z \right). \quad (21)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Значения напряжений в формуле (21) необходимо принять по справочным таблицам как предельные в соответствующих направлениях. Начальное напряжение σ_0 в центре сечения ствола дерева можно найти через предел прочности при сжатии вдоль волокон:

$$\sigma_{\text{вс}} = 625 \text{ кг/см}^2.$$

Тогда из (14) получим:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_{\text{вс}}}{6,2516} = 100 \text{ кг/см}^2.$$

Напряжение σ_{ta} принимаем равным пределу прочности при сжатии в тангенциальном направлении.

Численный расчет с использованием компьютерной программы Microsoft Excel[®] для главной относительной деформации R_0/R (R_0 – диаметр ядра) позволил получить данные, приведенные на рис. 7 при следующих параметрах [9], [17]:

$$\begin{aligned} E_a &= 110\,000 \text{ кг/см}^2; \\ E_t &= 3\,500 \text{ кг/см}^2; \\ E_r &= 7\,000 \text{ кг/см}^2; \\ \sigma_{ta} &= -10 \text{ кг/см}^2; \\ \sigma_0 &= 100 \text{ кг/см}^2; \\ \mu_{tr} &= 0,62; \mu_{ar} = 0,56. \end{aligned}$$

Анализ изменения R_0/R (рис. 7) подтверждает нашу гипотезу о местоположении появляющейся при раскачивании дерева полости, заполняющейся смолой («кармашка»).

Наибольшее скопление кармашков отмечается именно в тех местах ствола дерева, в которых R_0/R достигает экстремальных значений в зоне действия сжимающих напряжений с учетом ветровой нагрузки (рис. 7). В этом же месте, при отклонении ствола в противоположную сторону от действия ветровой нагрузки, возникают максимальное напряжение и деформация противоположного знака.

Таким образом, имеет место циклическое изменение деформации и напряжения. Это служит главной причиной образования кармашков. При нагревании солнечными лучами ствола дерева с южной стороны происходит некоторое снижение физико-механических свойств древесины, что способствует образованию

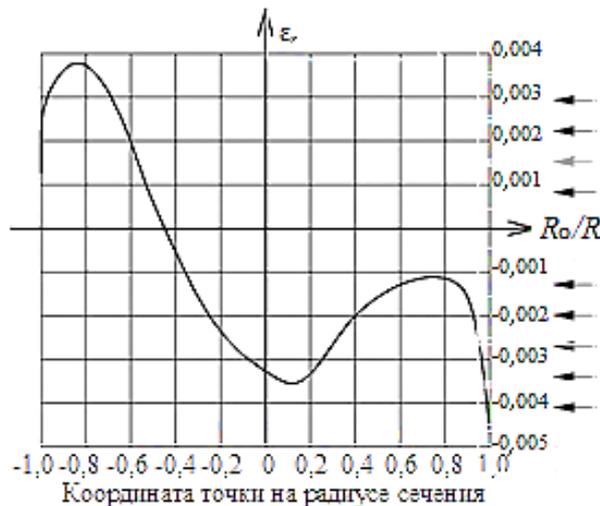


Рис. 7. Распределение главной относительной деформации в радиальном направлении по диаметру сечения ствола: ϵ_r – относительная деформация в радиальном направлении

микрповреждений, заполняющихся на первом этапе менее вязкой и текучей смолой. При повышении давления смолы в кармашке формируются более благоприятные условия развития полости по сравнению с обращенной на север стороной ствола.

Теоретические расчеты подтверждаются экспериментальными результатами, полученными при изучении характеристик и положения кармашков на стволе. Исследования проведены в 2011 г. на базе Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Амосова (г. Якутск) [12]. В рамках данной работы с использованием стандартных методик и современного оборудования изучены основные физико-механические показатели древесины лиственницы даурской, произрастающей на территории Якутии. Пределы прочности при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон образцов лиственницы даурской с влажностью выше 30 % определены на оборудовании механической испытательной межкафедральной лаборатории Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (Санкт-Петербург) и в лаборатории испытаний ООО «Алмаз» (г. Якутск).

Распределение главной относительной деформации в радиальном направлении по диаметру сечения ствола в зависимости от его длины представлено на рис. 8.

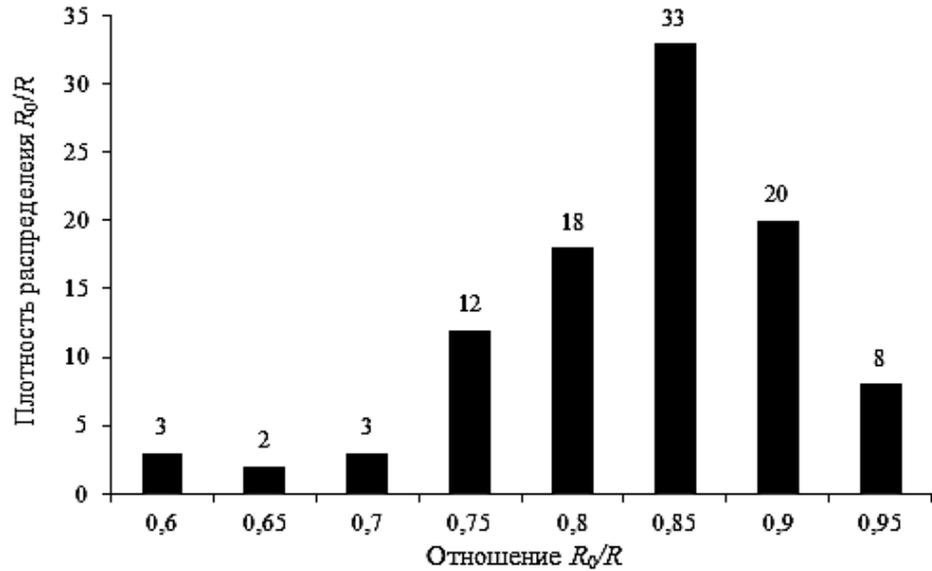


Рис. 8. Плотность распределения главной относительной деформации в радиальном направлении по диаметру сечения ствола

На рис. 9 приведена плотность распределения кармашков по диаметру сечения ствола в относительных координатах.

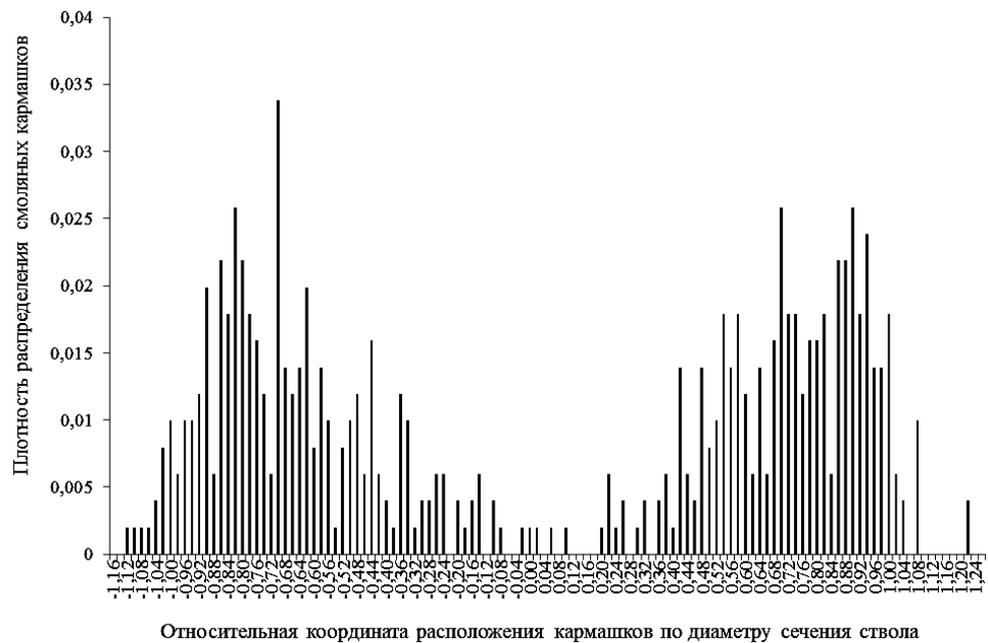


Рис. 9. Распределение количества кармашков по диаметру сечения ствола

Выводы

1. При размере ядровой зоны $(0,8...0,9)R$ начальное напряжение распределяется по радиусу сечения ствола дерева в виде параболоида 14-й степени.

2. Наибольшее количество смоляных кармашков расположено в зоне ствола, в которой главная относительная деформация в радиальном направлении достигает максимального значения.

3. Полученные математические модели напряжений и деформаций в деревьях с учетом ветровой нагрузки позволяют совершенствовать схемы раскроя пиловочника в целях получения высококачественных пиломатериалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ашкенази Е.К.* Анизотропия древесины и древесных материалов. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 224 с.

2. *Белов С.В.* Ветер – главный фактор, определяющий форму стволов деревьев и их устойчивость // Лесоводство, лесные культуры и почвоведение: межвуз. сб. науч. тр. Вып. III. Л.: ЛТА, 1974. С. 3–24.

3. *Глухих В.Н.* К вопросу о напряжениях в стволе дерева из-за собственного веса // Леса России в XXI веке: материалы 5-й междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2010. С. 5–11.

4. *Глухих В.Н., Акоюн А.Л.* Начальные напряжения в древесине: моногр. СПб.: СПбГАСУ, 2016. 118 с.

5. *Глухих В.Н., Черных А.Г.* Анизотропия древесины. Технологический аспект: моногр. СПб.: СПбГАСУ, 2013. 240 с.

6. ГОСТ 2140–81. Видимые пороки древесины. Классификация, термины и определения, способы измерения. М.: Изд-во стандартов, 1981. 118 с.

7. *Иванов Л.А.* Биологические основы добывания терпентина в СССР. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1940. 289 с.

8. *Кузнецов А.И.* Внутренние напряжения в древесине. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1950. 59 с.

9. *Леонтьев Н.Л.* Упругие деформации древесины. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1952. 120 с.

10. *Леонтьев Н.Л.* Влияние влажности на физико-механические свойства древесины. М.: Гослесбумиздат, 1962. 114 с.

11. *Лехницкий С.Г.* Теория упругости анизотропного тела. 2-е изд., перераб и доп. М.: Наука, 1977. 416 с.

12. *Чахов Д.К., Докторов И.А., Лавров М.Ф., Охлопкова А.Ю., Семенова С.А.* Оценка качества древесного сырья хвойных пород, произрастающих в Якутии: отчет о НИР (1 этап). Якутск, 2011. 116 с.

13. *Crown D.J.* Resin Pockets: Their Occurrence and Formation in New Zealand Forests // New Zealand Journal of Forestry. 1973. Vol. 18(2). Pp. 233–251.

14. *Kübler H.* Studien über Wachstumsspannungen des Holzes – Erste Mitteilung: Die Ursache der Wachstumsspannungen und die Spannungen quer zur Faserrichtung // Holz als Roh- und Werkstoff. 1959. Vol. 17, iss. 1. Pp. 1–9.

15. *Lerm F.J.* A Method for Three-Dimensional Stem Analysis and Its Application in a Study on the Occurrence of Resin Pockets in *Pinus patula*: Master of Science in Forestry (Wood Products Science) Diss. South Africa, Stellenbosch, 2013. 116 p.

16. *Temnerud E., Valinger E., Sundberg B.* Induction of Resin Pockets in Seedlings of *Pinus sylvestris* L. by Mechanical Bending Stress During Growth // *Holzforschung*. 1999. Vol. 53, no. 4. Pp. 386–390.

17. *Ylinen A.* Über die mechanische Schaftformtheorie der Bäume // *Silva Fennica*. 1952. No. 76. 51 p.

18. *Wood C.J.* Understanding Wind Forces on Trees // *Wind and Trees*. Ed. by M.P. Coutts, J. Grace. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. Pp. 133–164.

Поступила 15.03.17

UDC 674.038.1

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.5.35

Resin Pocket Formation in Tree Stems of Dahurian Larch

V.N. Glukhikh¹, Doctor of Engineering Sciences, Professor

A.Yu. Okhlopkova², Wood Process Engineer

¹Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Vtoraya Krasnoarmeyskaya ul., 4, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; e-mail: vnglukhikh@mail.ru

²Woodworking Complex “Asia Les”, per. Oblachnyi, 78A, off. 11, Khabarovsk, 680030, Russian Federation; e-mail: anna.okhlopkova@gmail.com

The paper analyzes the study results of native and foreign authors of the strain-stress state and distribution of internal stresses in a tree stem. The cyclic tensile and compressive stresses, arising at the wind load, are superimposed on the initial stresses when their further modifications in the tree growth process. The tree stem as a balanced system and a living organism strives to compensate the arising loads by increasing the density of cell walls and changing their structure – twisting. The occurrence of extreme loads and cyclic rocking loads can cause microdamages – cracks. The cavities of coniferous trees are filled with a natural antiseptic – resin. A further increase of cavities and filling of resin pockets occur under the influence of fluctuating compression and tensile stresses. In accordance with the nature of initial stresses in the radial and tangential directions, the pockets on the average are longer in the zones of the greatest radial tensile stresses. The goal of research is the substantiation of the location of the greatest resin pockets accumulation. Based on the fact that the shape of a trunk corresponds to the shape of a rod of equal resistance, in which the stresses in the outer fibers during bending should be the same over the entire height of the tree, we have calculated the circumferential and radial stresses along the radius of the stem cross section. Taking into account the relationship between the size of the core zone, stresses at the center and along the outline of the section and ultimate strength of wood under static bending and compression, the authors have used the distribution function of the initial longitudinal stress in the form of a paraboloid of the 14th degree to calculate the initial stresses in the Dahurian

For citation: Glukhikh V.N., Okhlopkova A.Yu. Resin Pocket Formation in Tree Stems of Dahurian Larch. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 5, pp. 35–52. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.5.35

larch stem by the material resistance methods. As a result, the epure of stem total stress has been obtained. According to the generalized Hooke's law, we have designed a distribution graph of the main relative strain in the radial direction along the diameter of the stem cross section. As a confirmation of the theory of the resin pockets formation, we have conducted the laboratory tests to determine the strength limits when static bending and compression along the fibers, taking into account the ratio of radii of heartwood and sapwood in the samples. The study of the pocket localization along the diameter of the stem cross section of Dahurian larch has proved that the greatest resin pockets accumulation is in the zone of maximum radial deformation.

Keywords: wood, tree stem, strain-stress state, internal and initial stress, growth stress, resin pocket, Dahurian larch.

REFERENCES

1. Ashkenazi E.K. *Anizotropiya drevesiny i drevesnykh materialov* [Anisotropy of Wood and Wood Materials]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1978. 224 p. (In Russ.)
2. Belov S.V. Veter – glavnyy faktor, opredelyayushchiy formu stvolov derev'ev i ikh ustoychivost' [The Wind as the Main Factor Determining the Shape of Tree Stems and Their Stability]. *Lesovodstvo, lesnye kul'tury i pochvovedenie* [Forestry, Forest Cultures and Soil Science]. Leningrad, 1974, iss. III, pp. 3–24.
3. Glukhikh V.N. K voprosu o napryazheniyakh v stvole dereva iz-za sobstvennogo vesa: [On the Stresses in a Tree Stem Because of Its Own Weight] materialy 5-y mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Lesn Rossii v XXI veke» Proc. 5th Inter. Sci. and Practical Conf. “Forests of Russia in the 21st Century”. Saint Petersburg, 2010, pp. 5–11. (In Russ.)
4. Glukhikh V.N., Akopyan A.L. *Nachal'nye napryazheniya v drevesine: monogr.* [Initial Stresses in Wood]. Saint Petersburg, SPSUACE Publ., 2016. 118 p. (In Russ.)
5. Glukhikh V.N., Chernykh A.G. *Anizotropiya drevesiny. Tekhnologicheskii aspekt: monogr.* [Anisotropy of Wood. Technological Aspect]. Saint Petersburg, SPSUACE Publ., 2013. 240 p. (In Russ.)
6. *GOST 2140–81. Vidimye poroki drevesiny. Klassifikatsiya, terminy i opredeleniya, sposoby izmereniya* [State Standard 2140–81. Visible Defects of Wood. Classification, Terms and Definitions, Methods of Measurement]. Moscow, Standartinform Publ., 1981. 118 p.
7. Ivanov L.A. *Biologicheskie osnovy dobyvaniya terpentina v SSSR* [Biological Basis for the Terpentine Extraction in the USSR]. Moscow; Leningrad, Goslesbumizdat Publ., 1940. 289 p. (In Russ.)
8. Kuznetsov A.I. *Vnutrennie napryazheniya v drevesine* [Internal Stresses in Wood]. Moscow; Leningrad, Goslesbumizdat Publ., 1950. 59 p. (In Russ.)
9. Leont'ev N.L. *Uprugie deformatsii drevesiny* [Elastic Deformation of Wood]. Moscow; Leningrad, Goslesbumizdat Publ., 1952. 120 p. (In Russ.)
10. Leont'ev N.L. *Vliyanie vlazhnosti na fiziko-mekhanicheskie svoystva drevesiny* [The Moisture Effect on the Physical and Mechanical Properties of Wood]. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1962. 114 p. (In Russ.)
11. Lekhnitskiy S.G. *Teoriya uprugosti anizotropnogo tela* [The Anisotropic Theory of Elasticity]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 416 p. (In Russ.)

12. Chakhov D.K., Doktorov I.A., Lavrov M.F., Okhlopkova A.Yu., Semenova S.A. *Otsenka kachestva drevesnogo syr'ya khvoynykh porod, proizrastayushchikh v Yakutii: otchet o NIR* [Quality Assessment of Wood Raw Materials of Coniferous Species Growing in Yakutia]. Yakutsk, 2011. 116 p. (In Russ.)
13. Crown D.J. Resin Pockets: Their Occurrence and Formation in New Zealand Forests. *New Zealand Journal of Forestry*, 1973, vol. 18(2), pp. 233–251.
14. Kübler H. Studien über Wachstumsspannungen des Holzes – Erste Mitteilung: Die Ursache der Wachstumsspannungen und die Spannungen quer zur Faserrichtung. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 1959, vol. 17, iss. 1, pp. 1–9.
15. Lerm F.J. *A Method for Three-Dimensional Stem Analysis and Its Application in a Study on the Occurrence of Resin Pockets in Pinus patula*: Master of Science in Forestry (Wood Products Science) Diss. South Africa, Stellenbosch, 2013. 116 p.
16. Temnerud E., Valinger E., Sundberg B. Induction of Resin Pockets in Seedlings of *Pinus sylvestris* L. by Mechanical Bending Stress During Growth. *Holzforschung*, 1999, vol. 53, no. 4, pp. 386–390.
17. Ylinen A. Über die mechanische Schaftformtheorie der Bäume. *Silva Fennica*, 1952, no. 76. 51 p.
18. Wood C.J. Understanding Wind Forces on Trees. *Wind and Trees*. Ed. by M.P. Coutts, J. Grace. Cambridge, Cambridge University Press, 1995, pp. 133–164.

Received on March 15, 2017
