

Научная статья

УДК 630*2(075)

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-5-100-113

Моделирование критических локальных деформаций коры растущего дерева при ветровой нагрузке

Г.Н. Колесников¹, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [A-1553-2014](https://orcid.org/0000-0001-9694-0264),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9694-0264>

О.И. Григорьева², канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

И.В. Григорьев³, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

В.А. Макуев⁴, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAD-2903-2020](https://orcid.org/0000-0002-5905-8923),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5905-8923>

Т.Н. Стородубцева⁵, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [ACF-4424-2022](https://orcid.org/0000-0002-4925-8542),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4925-8542>

В.В. Швецова⁶, канд. техн. наук; ResearcherID: [AAC-3395-2021](https://orcid.org/0000-0001-8566-2326),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8566-2326>

¹Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; kgn@petsu.ru

²Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; grigoreva_o@list.ru

³Арктический государственный агротехнологический университет, 3-й км, д. 3, ш. Сергеляхское, г. Якутск, Россия, 677007; silver73@inbox.ru

⁴Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141005; makuev@mgul.ac.ru

⁵Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; tamara-tns@yandex.ru

⁶Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 190005; vikt.schvetzova2012@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.10.21 / Одобрена после рецензирования 15.01.22 / Принята к печати 19.01.22

Аннотация. Взаимное влияние ветровой нагрузки и лесных насаждений достаточно хорошо изучено. К настоящему времени в данной области накоплен и отражен в публикациях большой объем ценной научной и практической информации. Известны данные о повреждении ветровой нагрузкой насаждений, ее воздействии на их прирост, а также о способности лесных насаждений снижать скорость и силу ветра. Тем не менее проблемы воздействия ветра как на отдельные деревья, так и на лесные массивы не теряют актуальности. Анализ литературы и интернет-ресурсов показал, за рамками исследований остался вопрос о влиянии ветровой нагрузки на качество выращиваемой древесины. Для каждой местности многолетние наблюдения и построенная на их основе роза ветров позволяют определить преобладающие силу и направление ветра. Зная особенности влияния ветровой нагрузки на качество лесоматериалов, получаемых после рубки насаждения, можно прогнозировать процент выхода деловой и низкокачественной древесины, а при плантационном выращивании леса целевым образом влиять на этот показатель, высаживая посадочный материал с учетом этих

© Колесников Г.Н., Григорьева О.И., Григорьев И.В., Макуев В.А., Стородубцева Т.Н., Швецова В.В., 2022

Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

данных. Разработана методика для теоретической оценки вероятности появления критических деформаций коры в сжатой зоне, которая образуется при изгибе растущего дерева под действием ветровой нагрузки. В качестве теоретической основы методики использованы классические исследования критического состояния сжатых стержней на упругом основании. Роль стержня выполняет участок коры растущего дерева, а роль упругого основания – камбий и другие живые клетки, находящиеся между корой и древесиной ствола. Для получения количественных оценок предложено соотношение, достаточно простое для практического применения. Адекватность результатов моделирования подтверждена их согласованностью с опытными данными. Применение разработанной методики показано на примерах.

Ключевые слова: ветровая нагрузка на дерево, ветровая нагрузка на насаждение, влияние ветровой нагрузки на качество древесины, деформации коры, целевое выращивание леса, моделирование деформаций

Благодарности: Авторы выражают глубокую признательность коллегам по научной школе «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» за ценные сведения и замечания, высказанные при подготовке данной работы.

Для цитирования: Колесников Г.Н., Григорьева О.И., Григорьев И.В., Макуев В.А., Стородубцева Т.Н., Швецова В.В. Моделирование критических локальных деформаций коры растущего дерева при ветровой нагрузке // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 100–113. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-100-113>

Original article

Modeling of Critical Local Deformations of Growing Tree Bark under Wind Loads

Gennady N. Kolesnikov¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [A-1553-2014](https://orcid.org/0000-0001-9694-0264),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9694-0264>

Olga I. Grigoreva², Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

Igor V. Grigorev³, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

Valentin A. Makuev⁴, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAD-2903-2020](https://orcid.org/0000-0002-5905-8923),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5905-8923>

Tamara N. Storodubtseva⁵, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [ACF-4424-2022](https://orcid.org/0000-0002-4925-8542),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4925-8542>

Victoria V. Shvetsova⁶, Candidate of Engineering; ResearcherID: [AAC-3395-2021](https://orcid.org/0000-0001-8566-2326),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8566-2326>

¹Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation; kgn@petrsu.ru

²Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; grigoreva_o@list.ru

³Arctic State Agrotechnological University, 3-y km, 3, sh. Sergelyakhskoye, Yakutsk, 677007, Russian Federation; silver73@inbox.ru

⁴Mytischki Branch of Bauman Moscow State Technical University, ul. 1-ya Institutskaya, 1, Mytischki, Moscow Region, 141005, Russian Federation; makuev@mgul.ac.ru

⁵Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; tamara-tns@yandex.ru



⁶Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, ul. 2-ya Krasnoarmeyskaya, 4, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; vikt.schvetzova2012@yandex.ru

Received on October 5, 2021 / Approved after reviewing on January 15, 2022 / Accepted on January 19, 2022

Abstract. The interaction between wind loads and forest plantations has been fairly well understood. A large amount of valuable scientific and practical information has been obtained and published so far in this field. There are some known data on wind load damage to plantations, its effect on their growth, and the ability of forest plantations to reduce wind speed and force. Nevertheless, the issues of wind impact on both individual trees and forested areas remain relevant. Analysis of the literature and Internet resources showed that the research has left out the issue of the wind load impact on the grown wood quality. Multi-year observations and a wind rose created using these observations enable the determination of the prevailing wind strength and direction for each area. Knowing the features of the wind load impact on the quality of timber after logging, it is possible to predict the percentage of the yield of commercial and low-quality wood, and to purposefully influence this parameter in plantation forest growing by setting out the planting material in accordance with these data. The article shows the developed method for theoretical estimation of the probability of occurrence of critical bark deformations in the compressed zone, which appears when bending a growing tree due to wind load. Classical studies of the critical state of compressed rods on an elastic base were used as the theoretical basis of the method. A part of growing tree bark plays the role of a rod, while cambium and other living cells between the bark and the trunk wood play the role of the elastic base. A correlation simple enough for practical application is proposed in order to obtain quantitative estimates. Adequacy of the modeling results is confirmed by their consistency with the experimental data. The application of the developed methodology is shown on the examples.

Keywords: wind load on a tree, wind load on a plantation, wind load impact on wood quality, bark deformations, target forest cultivation, modeling of deformations

Acknowledgements: The authors gratefully acknowledge the valuable insights and comments made by colleagues at the Scientific School “Innovations in Logging Industry and Forestry” in the preparation of this paper.

For citation: Kolesnikov G.N., Grigoreva O.I., Grigorev I.V., Makuev V.A., Storodubtseva T.N., Shvetsova V.V. Modeling of Critical Local Deformations of Growing Tree Bark under Wind Loads. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 5, pp. 100–113. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-100-113>

Введение

Взаимодействие ветра и лесных насаждений, ветра и отдельных деревьев изучается в течение многих лет. К настоящему времени в данной области накоплен и отражен в публикациях большой объем ценной научной и практической информации. Тем не менее проблемы воздействия ветра как на отдельные деревья, так и на лесные массивы остаются актуальными, что подтверждается неослабевающим потоком публикаций на эту тему в специализированных журналах. Только некоторые из этих публикаций представлены в списке использованной литературы. Данная работа расширяет выводы недавно вышедших статей [3, 4, 15], использованы также результаты других цитируемых далее исследований.

В статье [22] рассматривается механическое воздействие ветра и снега на отдельные деревья и на деревья в насаждениях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), ели обыкновенной (*Picea abies* (L.) Karst.) и березы (*Betula* spp.) применительно к условиям Финляндии. По итогам исследования предложена механико-математическая модель, предсказывающая скорость ветра, при которой деревья на опушках леса будут вырваны с корнем или сломаны. За рамками этого исследования остался вопрос: будет ли повреждена кора дерева, если ветер заставит ствол согнуться, но не выдернет его с корнем. Изгиб ствола дерева вызывает растяжение одних условных продольных волокон и сжатие диаметрально противоположных (рис. 1).

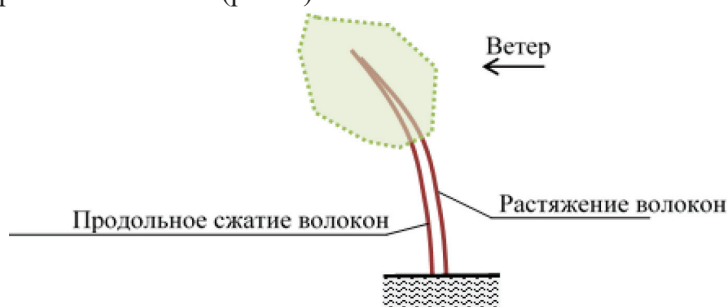


Рис. 1. Искривление ствола дерева под воздействием ветра и возникновение зон растяжения и сжатия

Fig. 1. The curvature of a tree trunk caused by wind and the occurrence of tension and compression zones

Ветровая нагрузка может быть причиной искривления стволов деревьев (рис. 2) и, как следствие, причиной повреждений (разрыва) камбиального слоя при его растяжении и отслоения камбия в сжатой зоне (рис. 3) [23]. Отслоение камбия визуально не обнаруживается, так как является внутренним повреждением древесины в сжатой зоне, появляющейся в результате воздействия ветра при изгибе ствола растущего дерева [15].



Рис. 2. Изгиб стволов сосны под ветровой нагрузкой

Fig. 2. Bending of pine trunks due to wind load

Такие повреждения в конечном итоге снижают качество древесины: ее прочность и возможности дальнейшего использования для производства важных деталей конструкционного назначения [6], – а значит и стоимость выращиваемой древесины [8, 9, 17, 21]. Получаемая в результате воздействия ветровой нагрузки неравномерность строения древесины, например свилеватость, может негативно сказываться на результатах модификации древесины [16, 18, 19].

Ветер воздействует на защитные полосы леса [2] и лесные массивы, пройденные выборочными рубками [5].

Поскольку отслоение камбия визуально не обнаруживается, а томография и другие экспериментальные методы исследования растущих деревьев остаются дорогостоящими, то для анализа условий отслоения применимы методы математического моделирования. Косвенным подтверждением отслоения может быть появление визуально определяемой волнообразной поверхности коры в сжатой зоне молодых деревьев при их изгибе, вызванном воздействием ветра. Одна из причин образования таких складок рассмотрена в статье [3]. Возникновение складок (волнообразной поверхности) в сжатой зоне можно наблюдать, например, в простом опыте при достаточно сильном изгибе ветви березы, когда первоначально гладкая поверхность коры трансформируется в сжатой зоне в волнистую поверхность (рис. 3). Рис. 3, б показывает, что на неизогнутой (левой) части образца складок нет, однако по мере роста деформаций изгиба складки становятся более выраженными, при этом возрастает их высота (т. е. высота волны волнообразной поверхности коры в сжатой зоне).



Рис. 3. Трансформация первоначально гладкой поверхности коры (а) в волнообразную поверхность (б) в зоне сжатия при изгибе [7]

Fig. 3. Transformation of the initially smooth bark surface (а) into undulated bark surface (б) in the bending compression zone [7]

В [20] экспериментально установлено, что у *Pinus sylvestris* статический изгиб вызывает снижение гидравлической проводимости на 19,5%; при динамическом изгибе, в зависимости от характеристик ветрового воздействия, этот показатель может достигать 88%. В том же исследовании [20] зафиксирована более высокая устойчивость к воздействию деформаций изгиба у *Picea abies*. Тем не менее деформации изгиба вследствие ветрового воздействия могут стать причиной появления некоторых пороков древесины, которые более подробно рассмотрены в [3, 4].

Экспериментальные исследования [20, 22, 23] важны в научном и практическом плане. Однако для лучшего понимания тенденций поведения ствола и ветвей дерева при изгибе, вызванном ветровой нагрузкой, необходимы соответствующие аналитические соотношения, механико-математические модели и методики, которые позволили бы прогнозировать последствия ветровой нагрузки на растущие деревья. К таким последствиям относятся не только ветровалы [12, 14, 24], но и пороки древесины, что более подробно рассмотрено в статьях [3, 4, 15]. Однако в литературе недостаточно полно исследованы вопросы моделирования возможных повреждений камбия и других клеток в сжатой зоне ствола и ветвей растущего дерева при ветровой нагрузке. Разработка и применение соответствующих моделей позволят уменьшить объем дорогостоящих экспериментальных исследований в данной области (но не исключить их), обеспечив при этом ученых новым инструментом прогнозирования последствий ветровой нагрузки, и помогут обосновывать рекомендации по совершенствованию технологий лесного хозяйства.

Цель исследования – разработка аналитической модели для прогнозирования критических деформаций коры и отслоения камбия в сжатой зоне, появляющихся при изгибе ствола растущего дерева под воздействием ветровой нагрузки.

Объекты и методы исследования

Исследования [15, 23] позволяют предположить, что трансформация коры, аналогичная показанной на рис. 3, имеет место в стволах деревьев. Однако для испытаний стволов растущих деревьев необходимы лебедки и другое специальное оборудование, иными словами, это технически сложные и не всегда экономически целесообразные эксперименты. Поэтому в ходе исследования были использованы методы математического моделирования механических систем с учетом особенностей строения коры и ее поведения при изгибе ствола растущего дерева.

В качестве объекта исследования выбран характерный участок коры в сжатой зоне, деформированный вследствие изгиба. Используя рис. 3, приведем пример характерного участка коры с волнообразной поверхностью (рис. 4) и его геометрическую модель (рис. 5).

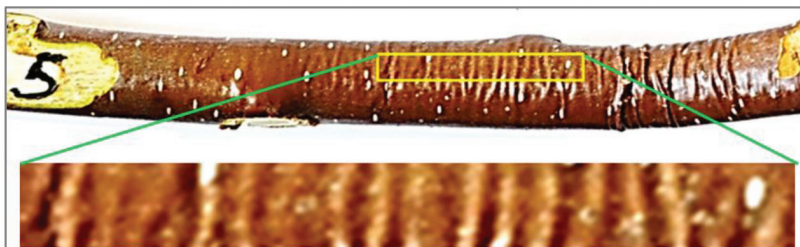


Рис. 4. Характерный участок коры с волнообразной поверхностью [7]

Fig. 4. Typical bark section with undulated surface [7]

В рамках данной статьи мы рассматриваем только относительно малый фрагмент коры, который локализован в области с наибольшими механическими напряжениями и деформациями. Рис. 4 и 5 показывают, что для приближенно-

го анализа закономерностей деформирования коры в сжатой зоне может быть использована модель гибкого стержня на упругом основании. Функции упругого основания выполняет слой камбия, примыкающие к нему живые клетки и древесина ствола (или ветви) дерева [23]. Таким образом, показанный на рис. 4 участок коры моделируется гибким стержнем на упругом основании. Продольная ось стержня ориентирована вдоль волокон ствола. Форму поперечного сечения стержня представим в виде квадрата, сторона которого равна толщине коры. При появлении сжимающих сил стержень деформируется и может перейти из прямолинейной формы равновесия в форму равновесия с искривленной осью (рис. 4 и 5, б). Такая форма продольной оси стержня (рис. 5, б) возникает как результат потери устойчивости упругого стержня на упругом основании. Явление потери устойчивости сжатого стержня на упругом основании достаточно подробно изучено и отражено в литературе [1]. Однако в известных нам публикациях не обнаружено применений теории сжатых стержней к моделированию критических деформаций коры и повреждений камбия растущего дерева при изгибе ствола и ветвей дерева под воздействием ветра.

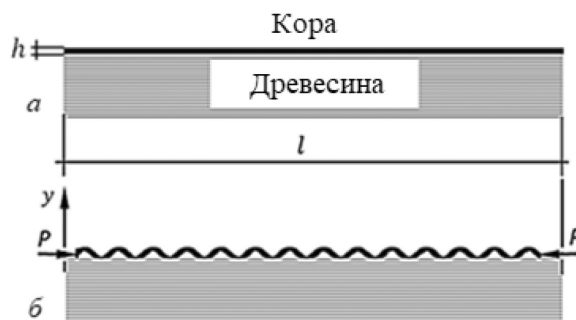


Рис. 5. Геометрическая модель характерного участка коры в сжатой зоне: до изгиба (а) и в процессе изгиба ствола дерева (или ветви) (б)

Fig. 5. Geometric model of the typical bark section in the compressed zone: before bending (a) and in the process of bending the tree trunk/branch (б)

Как показано выше, характерный участок коры в сжатой зоне растущего дерева моделируем гибким стержнем, на который действует продольная сжимающая сила $P = \sigma A$, где σ и A – соответственно напряжение в материале стержня и площадь его поперечного сечения. Кора растущего дерева с точки зрения геометрии – цилиндрическая или коническая тонкостенная оболочка, так как толщина коры мала по сравнению с диаметром ствола. Влиянием кривизны оболочки на форму поперечного сечения рассматриваемого стержня можно пренебречь, если форму поперечного сечения стержня представить в виде квадрата, сторона которого равна толщине коры h . Тогда момент инерции поперечного сечения стержня равен $\hat{I} = h^4 / 12$.

Принимая во внимание принцип Сен-Венана и достаточно большую гибкость стержня, можно предположить, что условия соединения торцов стержня с древесиной ствола мало влияют на деформации стержня. Итак, рассмотрим стержень, шарнирно опертый по торцам, связанный со сплошным упругим основанием, функции которого выполняют камбиальный слой и древесина ствола. Силы сцепления коры с древесиной сопротивляются отслоению коры. Однако отслоение появляется, если сжимающая сила достаточно велика (рис. 4 и 5, б). Отслоение коры сопровождается смещением точек на ее поверхности в радиальном направлении. Обозначим эти смещения как y . Их величина изменяется по длине стержня в интервале от нуля до высоты волны. Если прочность сцепления камбия с корой меньше прочности сцепления камбия с древесиной ствола, то камбий остается на древесине ствола и высота волны равна рассто-

янию от точки в вершине волны до слоя камбия (рис. 5, б). Силу сцепления, приходящуюся на единицу длины стержня l , обозначим как F . По физическому смыслу величина F имеет размерность N/m и является функцией $F = F(x)$, которая определяет неравномерность распределения силы сцепления, действующей в области контакта коры и камбия; в частности, при отслоении коры $F = 0$, при этом указанное выше перемещение $y > 0$.

Функцию F определим, используя следующие предположения и условия. Так как смещения в радиальном направлении достаточно малы, то по аналогии с законом Гука можно считать, что сила сцепления пропорциональна смещению, т. е. $F = cy$. Здесь c – коэффициент пропорциональности, его размерность N/m^2 .

Для моделирования деформированного состояния участка коры в сжатой зоне воспользуемся результатами исследований, известных по книге [1]. Предполагаем, что линия на рис. 5, б состоит из n полуволин синусоидальной формы. Уравнение этой линии

$$y = A \sin \frac{n\pi x}{l}. \quad (1)$$

В уравнении (1) учтены только геометрические аспекты задачи. Принимая во внимание физические и механические аспекты, запишем известное по [1] дифференциальное уравнение оси стержня в деформированном состоянии (рис. 5, б):

$$\hat{E}I \frac{d^4 y}{dx^4} + P \frac{d^2 y}{dx^2} + cy = 0, \quad (2)$$

где \hat{E} – модуль упругости материала коры, измеренный вдоль волокон. Обозначим

$$\frac{P}{\hat{E}I} = k^2; \quad \frac{c}{\hat{E}I} = r. \quad (3)$$

Параметр r (3) связан с числом полуволин и длиной l соотношением [1]:

$$\frac{n\pi}{l} = \sqrt[4]{r}. \quad (4)$$

Используя (2) и (3), запишем однородное линейное уравнение

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + k^2 \frac{d^2 y}{dx^2} + ry = 0. \quad (5)$$

Решение уравнения (5) и примеры его применения к анализу критического состояния сжатых тонкостенных элементов металлических конструкций представлены в [1]. Рассмотрим новое применение этого уравнения в прикладной задаче, а именно, используя уравнение (5) и соотношения (1) и (3), выполним анализ критического состояния коры в сжатой зоне растущего дерева при его изгибе от ветровой нагрузки.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим методику применения представленных выше соотношений (1) и (3) и уравнения (5), которые позволяют аналитически определить критическую силу и критическое напряжение для наиболее нагруженного участка

коры в сжатой зоне при изгибе, вызванном воздействием ветра. Иными словами, смоделируем такое состояние деформированного участка коры, когда ветер вызывает искривление ствола настолько большое, что прямолинейная форма равновесия условного стержня становится неустойчивой и стержень переходит в другое устойчивое, но уже искривленное состояние равновесия. Индикатором такого состояния в теории [1] и на практике (рис. 4) является волнообразная деформация коры:

$$P_{cr}^{kop} = 2\hat{E}\hat{I}\sqrt{r} = 2\sqrt{\hat{E}\hat{I}c}. \quad (6)$$

Соответственно, критическое напряжение

$$\sigma_{cr}^{kop} = \frac{P_{cr}^{kop}}{A}. \quad (7)$$

Принимая во внимание, что $\hat{I} = h^4 / 12$ и $A = h^2$, преобразуем соотношения (6) и (7):

$$P_{cr}^{kop} = h^2 \sqrt{\hat{E}c / 3}; \quad (8)$$

$$\sigma_{cr}^{kop} = \sqrt{\hat{E}c / 3}. \quad (9)$$

Из соотношения (8) следует, что сила, вызывающая критические деформации коры в сжатой зоне при ветровой нагрузке пропорциональна квадрату толщины коры. С увеличением модуля упругости коры и сцепления коры с древесиной ствола растущего дерева критическая сила возрастает.

Согласно соотношению (9), в рамках данной модели на критическое напряжение в коре растущего дерева влияют только 2 фактора: модуль упругости коры, измеренный вдоль волокон, и указанный выше коэффициент пропорциональности c , который по своему физическому смыслу характеризует прочность сцепления коры с древесиной ствола. Однако следует принимать во внимание также влияние влажности и температуры. В летний период прочность сцепления коры с древесиной ствола существенно меньше, чем в зимний период [10]. Модуль упругости коры уменьшается, если растет влажность коры. Например, известные из литературы эксперименты подтвердили наблюдение, что сухая кора *Pinus sylvestris* более жесткая ($\hat{E} = 4700$ МПа), чем влажная ($\hat{E} = 360$ МПа) [25]. Данные о толщине коры на растущих деревьях в зависимости от породы и места замера приведены в книге [10]. Прочность сцепления древесины с корой (обозначена выше как c) зависит от вида древесных растений и может находиться в интервале от 275 до 2500 кПа [11].

Влияние изменений модуля упругости коры и адгезии коры к древесине ствола можно визуальнo оценить с помощью графиков функции (8) по рис. 6 и 7.

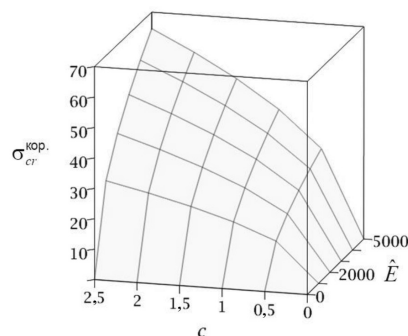
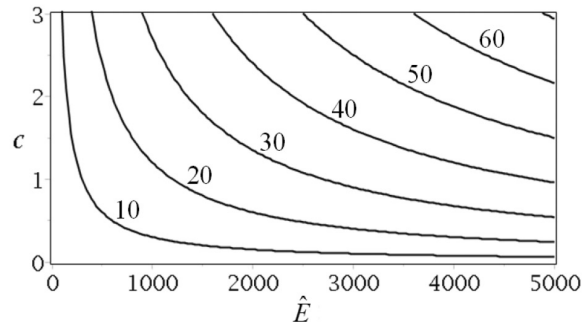


Рис. 6. Зависимость критического напряжения в сжатой зоне коры от модуля упругости коры и сцепления коры с древесиной ствола. Все значения определены в мегапаскалях

Fig. 6. Dependence of the critical stress in the compressed bark zone on the bark elasticity modulus and the bark-tree adhesion. All values are defined in megapascal

Рис. 7. Изолинии критического напряжения в сжатой зоне коры при изгибе дерева ветром ($\sigma_{cr}^{kop} = 10, 20, \dots, 60$). Все значения определены в мегапаскалях

Fig. 7. Isolines of the critical stress in the compressed bark zone at tree bending by wind ($\sigma_{cr}^{kop} = 10, 20, \dots, 60$). All values are defined in megapascal



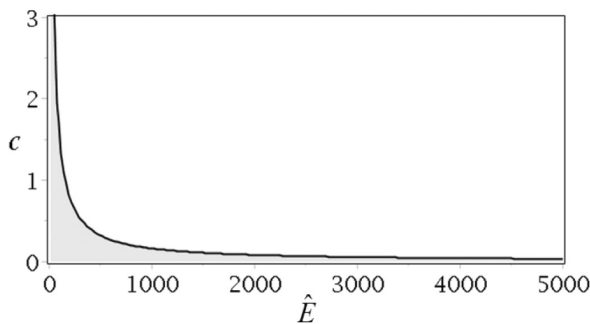
В рамках обсуждения работы воспользуемся результатами исследования [13], в котором установлено: в одном из модельных случаев ветровая нагрузка вызывает изгиб ствола растущего дерева и, соответственно, напряжение в древесине ствола, равное 22 МПа. Предполагая, что напряжение в коре может быть в диапазоне от $\sigma/10$ до $\sigma/3$, т. е. от 2,2 до 7,3 МПа, из соотношения (9) находим: критическое состояние, аналогичное показанному на рис. 5, б, реализуется, если $\hat{E}c = 3(\sigma^{kop})^2$. Данные рис. 7 подтверждают, что нельзя исключать возможность критического состояния при таком относительно небольшом воздействии. Критические деформации коры появятся, если очень мал модуль упругости коры или очень мало сцепление коры с древесиной ствола (ветви) растущего дерева. Эти 2 условия реализуются для растущих молодых деревьев (ветвей) или при высокой влажности. Однако для практики необходимы количественные оценки возможности появления критических деформаций коры в сжатой зоне растущего дерева (ветви) при ветровой нагрузке.

Представленные на рис. 7 результаты моделирования позволяют приближенно оценить вероятность появления критических деформаций коры в сжатой зоне при изгибе растущего дерева под действием ветровой нагрузки. Например, пусть $\sigma^{kop} = 7,3$ МПа, максимальные значения модуля упругости коры и сцепления коры с древесиной ствола равны соответственно 5000 и 3 МПа. Тогда, используя формулу (9), можно показать, что вероятность повреждения (p) определяется отношением закрашенной части графика на рис. 8 к площади прямоугольника, стороны которого равны c_{max} и \hat{E}_{max} . Площадь закрашенной части графика найдена интегрированием функции (9).

$$p = \frac{3(\sigma^{kop})^2}{c_{max} \hat{E}_{max}} \left(1 + \ln \left(\frac{3(\sigma^{kop})^2}{c_{max} \hat{E}_{max}} \right) \right). \quad (10)$$

Рис. 8. Результаты моделирования критической деформации коры. Все значения определены в мегапаскалях

Fig. 8. Results of modeling the bark critical deformation. All values are defined in megapascal



На рис. 8 закрашенная часть площади графика ограничена осями координат и изолинией $\sigma^{\text{корт}} = 7,3$ МПа, доля этой площади, т. е. вероятность критических деформаций коры в сжатой зоне (10), равна $p = 0,059$ (5,9 %).

Заметим, что выше рассмотрена модель критического состояния того участка коры, в котором при изгибе ствола от ветровой нагрузки появляются наибольшие деформации (рис. 4). Механическое состояние ствола дерева не рассматривалось, поскольку этот вопрос изучен с различных сторон в работах [3–5, 7, 9, 13, 14, 20, 22]. В рамках данной работы термин «критическое состояние коры в сжатой зоне при изгибе ствола дерева» означает не только потерю устойчивости прямолинейной формы равновесия условного сжатого стержня на упругом основании (в качестве механической системы), но также (как следствие) повреждение слоя камбия и других живых клеток растущего дерева (в качестве биомеханической системы).

Комментируя рис. 8, отметим также, что представленные в графической форме результаты моделирования не учитывают в явном виде скорость ветра и его метеорологические характеристики. В разработанной методике данные характеристики учтены косвенно, через напряжения в коре дерева, поскольку эти напряжения непосредственно зависят от изгибных деформаций ствола дерева, которые, в свою очередь, зависят от скорости ветра, параметров кроны дерева, влажности воздуха. Затронутый вопрос важен для лесохозяйственной практики и поэтому может составить предмет дальнейших исследований, относящихся, например, к плантационному лесоводству, где есть некоторые возможности защиты от ветрового воздействия.

Завершая обсуждение, отметим, что изгибные деформации стволов деревьев при небольшой скорости ветра могут быть несинхронными (или несинфазными), что видно на рис. 1. Существует доминирующее направление ветра – причина асимметрии формы поперечного сечения и свойств древесины [3] – данный аспект также может быть рекомендован к дальнейшему изучению.

Заключение

Разработана методика для теоретической оценки вероятности появления критических деформаций коры в сжатой зоне при изгибе растущего дерева под действием ветровой нагрузки. В качестве теоретической основы методики использованы классические исследования сжатых стержней на упругом основании. Для получения количественных оценок предложено соотношение, достаточно простое для практического применения. Адекватность результатов моделирования подтверждена их согласованностью с опытными данными. Применение методики показано на примерах.

Открытым остается вопрос: стимулирует или угнетает развитие древесного растения умеренная ветровая нагрузка? Определенный вклад в будущее решение данного вопроса вносят представленные в статье результаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Вольмир А.С.* Устойчивость деформируемых систем. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1967. 984 с.
Vol'mir A.S. *Stability of Deformable Systems*. Moscow, Nauka Publ., 1967. 984 p. (In Russ.).
2. *Герц Э.Ф., Уразова А.Ф., Курдышева Е.В., Уразов П.Н.* Эффективность защитных лесных полос вдоль железной дороги // Вестн. АГАТУ. 2021. № 1(1). С. 56–60.
Gerts E.F., Urazova A.F., Kurdyшева E.V., Urazov P.N. Effectiveness of Protective Forest Strips along the Railway. *Vestnik ASAU*, 2021, no. 1(1), pp. 56–60. (In Russ.).
3. *Глухих В.Н., Черных А.Г.* Обоснование овальности формы сечений стволов деревьев при их росте с наклоном // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С. 166–175.
Glukhikh V.N., Chernykh A.G. Reasoning of Tree Cross Sections Oval Shaping while Growing with an Inclination. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2020, no. 5, pp. 166–175. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-5-166-175>
4. *Григорьева О.И., Григорьев И.В., Давтян А.Б., Иванов В.А., Гринько О.И., Швабова Н.В., Калита А.Ю.* Влияние ветровой нагрузки на образование пороков в растущих деревьях // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 2(50). С. 63–69.
Grigorjeva O.I., Grigorjev I.V., Davtyan A.B., Ivanov V.A., Grinko O.I., Shvabova N.V., Kalita A.Yu. Influence of Wind Load on the Formation of Defects in Growing Trees. *Systems. Methods. Technologies*, 2021, no. 2(50), pp. 63–69. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2021-2-63-69>
5. *Куницкая О.А., Никитина Е.И.* Экологические аспекты выборочных рубок леса // Эколого-экономические и технологические аспекты устойчивого развития Республики Беларусь и Российской Федерации: сб. ст. III Междунар. науч.-техн. конф. «Минские научные чтения-2020»: в 3 т. Минск: БГТУ, 2021. Т. 1. С. 286–291.
Kunitskaya O.A., Nikitina E.I. Ecological Aspects of Shelterwood Cutting. *Ecological, Economic and Technological Issues of Sustainable Development of the Republic of Belarus and the Russian Federation: Collection of Academic Papers of the III International Scientific and Technical Conference "Minsk Scientific Readings-2020"*: In 3 Vol. Minsk, BelSTU Publ., 2021, vol. 1, pp. 286–291. (In Russ.).
6. *Куницкая О.А., Швецова В.В., Тихонов Е.А.* Современное деревянное судостроение в России // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2021. № 6. С. 3–12.
Kunitskaya O.A., Shvetsova V.V., Tikhonov E.A. Modern Wooden Shipbuilding in Russia. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya = Repair. Recovery. Modernization*, 2021, no. 6, pp. 3–12. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2021-0-6-3-12>
7. *Куницкая О.А., Колесников Г.Н., Лукин А.Е., Григорьев И.В.* Повышение эффективности групповой окорки длинномерных лесоматериалов. Петрозаводск: ПетрГУ, 2016. 107 с.
Kunitskaya O.A., Kolesnikov G.N., Lukin A.E., Grigorev I.V. *Improving the Efficiency of Group Debarking of Long-Cut Timber*. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2016. 107 p. (In Russ.).
8. *Никитина Т.А., Шестаков Ю.Д., Лабудин Б.В., Куницкая О.А., Тихонов Е.А., Калита А.Ю.* Прочностной ресурс древесины лиственницы Беломорского Севера при сжатии в главных и диагональных осях анизотропии // Деревообработ. пром-сть. 2020. № 4. С. 21–31.
Nikitina T.A., Shestakov Yu.D., Labudin B.V., Kunitskaya O.A., Tikhonov E.A., Kalita A.Yu. Strength Resource of Larch Wood of the White Sea North under Compression in the Main and Diagonal Axes of Anisotropy. *Derevoobrabatativaushaya promishlennost' = Wood-working industry*, 2020, no. 4, pp. 21–31. (In Russ.).

9. Тамби А.А., Юркова О.В., Куницкая О.А., Степанищева М.В. Исследование влияния физических свойств и строения древесины сосны на ее прочность // Системы. Методы. Технологии. 2017. № 4(36). С. 157–161.

Tambi A.A., Yurkova O.V., Kunitskaya O.A., Stepanishcheva M.V. Research of the Influence of the Physical Properties and Structure of Pine Wood on Its Strength. *Systems. Methods. Technologies*, 2017, no. 4(36), pp. 157–161. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2017-4-157-161>

10. Цывин М.М. Использование древесной коры. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 94 с.
Tsyvin M.M. *The Use of Tree Bark*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 94 p. (In Russ.).

11. Chahal A., Ciolkosz D. A Review of Wood-Bark Adhesion: Methods and Mechanics of Debarking for Woody Biomass. *Wood and Fiber Science*, 2019, vol. 51, no. 3, pp. 288–299. <https://doi.org/10.22382/wfs-2019-027>

12. Falťan V., Katina S., Minár J., Polčák N., Bánovský M., Maretta M., Zámečník S., Petrovič F. Evaluation of Abiotic Controls on Windthrow Disturbance Using a Generalized Additive Model: A Case Study of the Tatra National Park, Slovakia. *Forests*, 2020, vol. 11, iss. 12, art. 1259. <https://doi.org/10.3390/f11121259>

13. Gaffrey D., Kniemeyer O. The Elasto-Mechanical Behaviour of Douglas Fir, Its Sensitivity to Tree-Specific Properties, Wind and Snow Loads, and Implications for Stability – A Simulation Study. *Journal of Forest Science*, 2002, vol. 48, no. 2, pp. 49–69. <https://doi.org/10.17221/11856-JFS>

14. Kärhä K., Anttonen T., Poikela A., Palander T., Laurén A., Peltola H., Nuutinen Y. Evaluation of Salvage Logging Productivity and Costs in Windthrown Norway Spruce-Dominated Forests. *Forests*, 2018, vol. 9, iss. 5, art. 280. <https://doi.org/10.3390/f9050280>

15. Krišāns O., Matisons R., Kitenberga M., Donis J., Rust S., Elferts D., Jansons Ā. Wind Resistance of Eastern Baltic Silver Birch (*Betula pendula* Roth.) Suggests Its Suitability for Periodically Waterlogged Sites. *Forests*, 2021, vol. 12, iss. 1, art. 21. <https://doi.org/10.3390/f12010021>

16. Kunickaya O., Runova E., Chzhan S., Zhuk A., Markov O., Garus I., Nikiforova V., Ivanov V. Improving Impregnation Techniques for Fine Coniferous and Non-Coniferous Wood. *Journal of Applied Engineering Science*, 2020, vol. 18, no. 4, pp. 520–528. <https://doi.org/10.5937/jaes0-27654>

17. Kunickaya O., Tanyukevich V., Khmeleva D., Kulik A., Runova E., Savchenkova V., Voronova A., Lavrov M. Cultivation of the Targeted Forest Plantations. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 2020, vol. 8, iss. 4, pp. 1385–1393. [https://doi.org/10.47277/JETT/8\(4\)1393](https://doi.org/10.47277/JETT/8(4)1393)

18. Kunickaya O.A., Shadrin A.A., Burmistrova O.N., Markov O.B., Gasparyan G.D., Davtyan A.B., Lapshina M.L., Sleptsova N.A., Ustinova V.V., Kruzhilin S.N. Wood Treatment with Hydro Impact: A Theoretical and Experimental Study. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2019, vol. 25, suppl. 2, pp. 158–166.

19. Kunickaya O.A., Shadrin A.A., Kremleva L.V., Mueller O.D., Ivanov V.A., Bederdinova O.I., Kruchinin I.N., Burgonutdinov A.M., Zakharova O.I., Struchkov N.A. Modeling of the Processes of the Modification of the Current Volume Warming by Drainage and Pressing. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2019, vol. 25, suppl. 2, pp. 167–177.

20. Mayr S., Bertel C., Dämon B., Beikircher B. Static and Dynamic Bending Has Minor Effects on Xylem Hydraulics of Conifer Branches (*Picea abies*, *Pinus sylvestris*). *Plant, Cell & Environment*, 2014, vol. 37, iss. 9, pp. 2151–2157. <https://doi.org/10.1111/pce.12307>

21. Morkovina S.S., Kunickaya O., Dolmatova L., Markov O., Nguyen V.L., Baranova T., Shadrina S., Grin'ko O. Comparative Analysis of Economic Aspects of Growing Seedlings with Closed and Open Root Systems: The Experience of Russia. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2021, vol. 18, iss. 2, pp. 19–26.

22. Peltola H., Kellomäki S., Hassinen A., Granander M. Mechanical Stability of Scots Pine, Norway Spruce and Birch: An Analysis of Tree-Pulling Experiments in Finland. *Forest Ecology and Management*, 2000, vol. 135, iss. 1-3, pp. 143–153. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00306-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00306-6)

23. Trockenbrodt M. Survey and Discussion of the Terminology Used in Bark Anatomy. *IAWA Bulletin*, 1990, vol. 11(2), pp. 141–166. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000511>

24. Urquiza Muñoz J.D., Magnabosco Marra D., Negrón-Juarez R.I., Tello-Espinoza R., Alegría-Muñoz W., Pacheco-Gómez T., Rifai S.W., Chambers J.Q., Jenkins H.S., Brenning A., Trumbore S.E. Recovery of Forest Structure Following Large-Scale Windthrows in the Northwestern Amazon. *Forests*, 2021, vol. 12, iss. 6, art. 667. <https://doi.org/10.3390/f12060667>

25. Wenig C., Dunlop J.W.C., Hehemeyer-Cürten J., Reppe F.J., Horbelt N., Krauthausen K., Fratzl P., Eder M. Advanced Materials Design Based on Waste Wood and Bark. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2021, vol. 379, iss. 2206, art. 20200345. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0345>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest