

УДК 630*181.23

МОДЕЛИ УСТОЙЧИВОСТИ ДЕРЕВЬЕВ И НАСАЖДЕНИЙ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ВЕТРА*

© 2004 г. Ю. В. Захаров¹, В. Г. Суховольский^{1, 2}

¹ Сибирский государственный технологический университет
660049 Красноярск, просп. Мира, 82

² Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН
660036 Красноярск, Академгородок

Поступила в редакцию 20.12.2002 г.

Предложены модели, описывающие воздействие ветра на отдельные деревья и лесные насаждения. Показано, что характер воздействия ветра на деревья и насаждения определяется типом корневой системы деревьев, размерами крон и особенностями пространственного размещения деревьев в насаждении.

Дерево, лесные насаждения, ветровые нагрузки, устойчивость, консоль.

В процессе роста дерево должно "решать" целый ряд задач, связанных с выживанием. Во-первых, дерево должно получить достаточное количество световой энергии. В большинстве случаев (за исключением так называемого стланика) у деревьев эта проблема решается путем выноса фотосинтезирующего аппарата вверх. Далее, дерево должно обеспечить поступление необходимого количества воды и минеральных солей из почвы, что достигается с помощью разветвленной корневой системы.

Однако вынос кроны дерева вверх, решая проблему улавливания света, рождает новые проблемы. Во-первых, транспорт воды и минеральных солей в высоко расположенную крону требует большого количества энергии, так что трата энергии на доставку воды в крону обесценивает выигрыш в получении световой энергии. Во-вторых, для высокого дерева с высоко расположенной мощной кроной встает проблема устойчивости дерева к ветровому воздействию. Решение этой проблемы путем увеличения мощности и глубины корневой системы связано с увеличением затрат энергии на проведение воды и минеральных солей из корня к основанию ствола и далее в крону.

Таким образом, для выживания дерева необходимо, чтобы его геометрические размеры удовлетворяли целому ряду противоречивых требований. С одной стороны, дерево не должно быть высоким, так как при этом возрастает вероятность вывала его ветром. С другой стороны, маленькое дерево со слабой кроной неспособно уловить достаточное количество световой энергии. Корневая система должна быть, с одной стороны, доста-

точно мощной для того, чтобы выполнять роль фундамента, удерживающего дерево, а, с другой — не может быть слишком разветвленной и глубокой, так как при этом растут энергетические расходы на транспорт веществ в дереве.

Тот факт, что деревья все-таки существуют и успешно выдерживают воздействие ветра, говорит о том, что в процессе эволюции удалось оптимальным образом совместить все эти противоречивые требования. При решении задачи об устойчивости деревьев к воздействию ветра необходимо рассматривать дерево не просто как механическую систему, на которую воздействует горизонтально направленная сила, но учитывать и экологические ограничения, налагаемые на форму ствола и кроны дерева. Настоящая работа посвящена разработке и анализу теоретических моделей, описывающих устойчивость деревьев и древостоев к ветровому воздействию.

УСТОЙЧИВОСТЬ ДЕРЕВА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЕТРА

Традиционно дерево представляют как жестко заземленную с одного конца балку, не учитывая при этом влияние корневой системы и ее структуры. При этом ссылаются на невозможность такого учета из-за сложности строения корневой системы. Однако такая модель не объясняет все известные результаты воздействия ветра на деревья: возможность как вывала дерева, так и излома ствола на определенной высоте; зависимость интенсивности ветровала (при одной и той же интенсивности ветра) от древесной породы и от характеристик подстилающей поверхности.

* Работа поддержана РФФИ (02-01-01017).

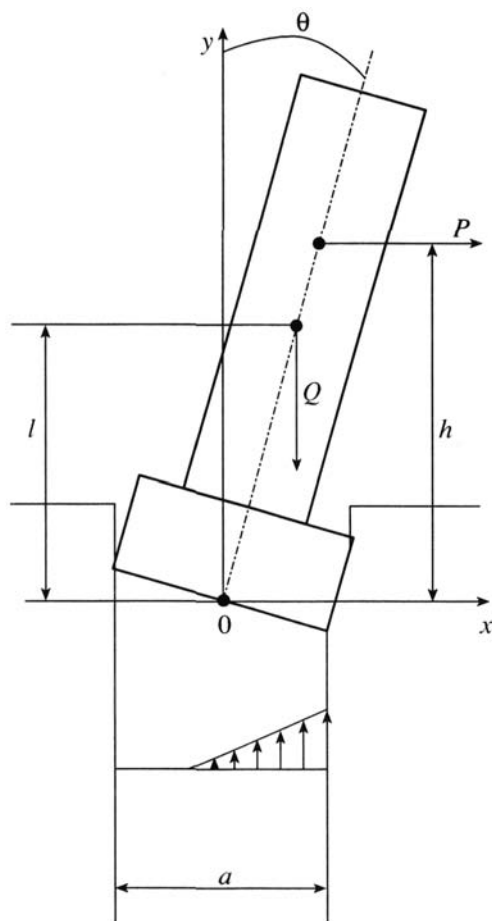


Рис. 1. Устойчивость колонны на упругом основании $0y$ и $0x$ - вертикальная и горизонтальная оси. Обозначение параметров см. текст.



Рис. 2. Кривая равновесных состояний для дерева: 1 - вертикальные корни, 2 - горизонтальные корни.

Для качественной оценки устойчивости дерева введем две модели, описывающие реакцию дерева на ветровое воздействие с учетом влияния

структуры корневой системы. При этом будем рассматривать деревья с двумя типами предельно обобщенных корневых систем - дерево со стержневой корневой системой, достаточно глубоко уходящей в почву (первый тип), и дерево с поверхностной корневой системой (второй тип) [2]. Конечно, любое дерево имеет как горизонтально, так и вертикально ориентированные корни, поэтому модели с "горизонтальной" или "вертикальной" корневыми системами характеризуют лишь основные особенности структуры корневой системы дерева.

Первая модель анализирует поведение дерева под ветровой нагрузкой как устойчивость жесткой колонны на упругом основании под действием горизонтально направленной силы P . Физические свойства основания описываются моделью Винклера, согласно которой реакция основания в некоторой точке пропорциональна осадке почвы под основанием в этой же точке $r = -cy$, где c - коэффициент пропорциональности.

Угол отклонения колонны (рис. 1) находится из уравнения моментов [6, 12]

$$Ph - Ql\theta + c\theta J = 0. \quad (1)$$

В этом уравнении первый член - момент горизонтальной силы ветра P , которая является распределенной нагрузкой и в таких расчетах заменяется сосредоточенной нагрузкой, приложенной в центре парусности, и тогда h - ордината точки приложения силы P ; второй член - момент силы веса колонны Q (в этом и последующем члене сделано приближение $\theta \approx \sin\theta \approx \text{tg}\theta$); третий член - момент распределенных сил реакции основания (J - момент инерции площади основания относительно оси, перпендикулярной плоскости чертежа и проходящей через центр тяжести подошвы фундамента).

Из (1) следует

$$P = (cJ - Ql)\theta/h. \quad (2)$$

При $P = 0$ находим критическое значение нагрузки - эйлерову нагрузку $Q_c = cJ/l$.

Зависимость (2) справедлива до тех пор, пока с ростом угла θ левая часть основания не начнет отрываться от почвы. Это показано на эпюре реакции основания на чертеже (рис. 1). Угол отрыва для основания в виде прямоугольника со сторонами a и b и моментом $J = ba^3/12$ равен $\theta_1 = 2Q/ca^2b$, а соответствующая сила $P_1 = Qa(1 - Q/Q_c)/6h$ (рис. 2).

При дальнейшем увеличении силы P связь угла отклонения и действующей силы становится нелинейной

$$P = (Q/h)[a/2 - (1/3)(2Q/\theta bc)^{1/2} - l\theta]. \quad (3)$$

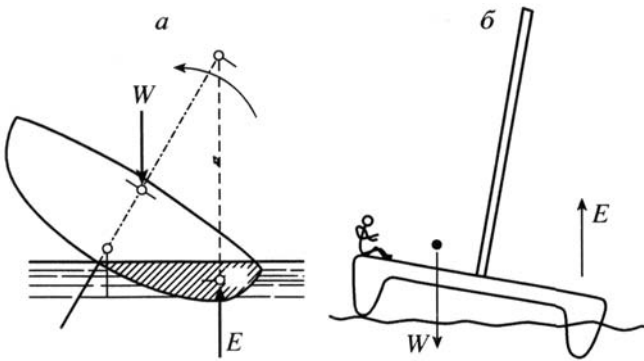


Рис. 3. Устойчивость швертбота (а) и катамарана (б): W - вес, E - плавучесть.

Зависимость $P(\theta)$ имеет максимум (рис. 2), определяющий критическую силу

$$P_c = (Qa/2h)[1 - (Q/Q_c)^{1/3}]. \quad (4)$$

Этому соответствует угол $\theta_c = (Q/18l^2bc)^{1/3}$. При $P > P_c$ равновесных состояний нет и колонна опрокидывается.

В приведенных расчетах были сделаны упрощающие предложения о малости угла $\theta \approx \sin\theta \approx \text{tg}\theta$, об абсолютной жесткости колонны, о малых осадках основания. При более корректном учете этих обстоятельств кривая равновесных состояний расположится несколько ниже изображенной кривой, но это уточнение не приводит к качественным изменениям поведения изучаемого объекта под воздействием ветровой нагрузки.

Для нас представляет интерес анализ связи между характеристиками кривой $P(\theta)$ и типом модельной корневой системы. Переход от "вертикальной" к "горизонтальной" модельной корневой системе сводится к увеличению горизонтальных размеров a и b основания. При этом будет увеличиваться момент инерции J , который пропорционален L^4 (или квадрату площади корневой системы S^2). Изменения расстояний l и h пропорциональны L (характерному размеру корневой системы), однако относительное изменение этих расстояний много меньше относительного изменения линейных размеров основания. Поэтому можно считать, что при переходе от предельного случая "вертикальной" к предельному случаю "горизонтальной" моделям корневых систем угол наклона прямолинейного участка кривой $P(\theta)$ (1) будет увеличиваться пропорционально L^3 , т.е. пропорционально $S^{3/2}$, а критическая сила P_c увеличивается пропорционально L , т.е. пропорционально $S^{1/2}$ (здесь S - площадь корневой системы). Величина критического угла наклона, при котором теряется устойчивость, будет уменьшаться пропорционально $L^{-1/3}$, но может быть и более сложная качественная зависимость. На рис. 2

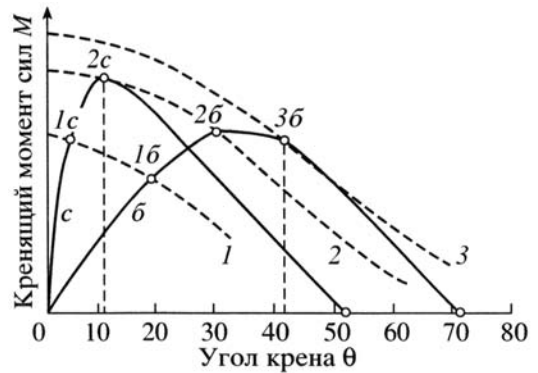


Рис. 4. Зависимости кренящих моментов сил M от угла крена θ для швертбота (б) и катамарана (с): 1, 2, 3 - кренящие моменты ветра для последовательно возрастающих скоростей ветра.

приведены кривые равновесных состояний для вертикального (1, критическая сила P_{c1}) и горизонтального (2, критическая сила P_{c2}) расположения корневой системы.

Вторая модель рассматривает устойчивость дерева под воздействием ветра как процесс, подобный устойчивости парусной яхты. Яхта создается для использования сил ветра и постоянно борется с ними, как и дерево. И если в этой борьбе побеждает ветер, то яхта, теряя устойчивость, ложится парусами на воду, а дерево ломается или, выворачиваясь с корнями, падает на землю.

Яхта типа "швертбот" (лодка с вертикальным килем-доской) - подобие дерева с вертикальной корневой системой. Двухкорпусная яхта типа "катамаран" - подобие дерева с горизонтальной корневой системой. Под действием постоянной силы ветра на парус яхта кренится (рис. 3). Точно так же под действием ветра на крону кренится дерево. Давление ветра на крону образует кренящий момент. При этом сила тяжести и сила реакции опоры, действующие на дерево, не находятся в одной плоскости, и образуют пару сил, стремящуюся вернуть дерево в нормальное положение. График на рис. 4 показывает качественный вид зависимостей действующих моментов сил M от угла крена θ . На рис. 4, 1-3 видно, что, когда кренящий момент ветра больше момента устойчивости (с, б), то дерево кренится до тех пор, пока моменты не выравняются. На рис. 4, 1 это точка 1с для дерева с модельной горизонтальной системой (подобного катамарану) и точка 1б для дерева с модельной вертикальной корневой системой (подобного швертботу). Видно, что дерево с горизонтальной корневой системой (рис. 4, с) кренится гораздо меньше, чем дерево с вертикальной корневой системой (рис. 4, б), т.е. оно более устойчиво. С ростом скорости ветра (рис. 4, 2) дерево с горизонтальной корневой системой достигает максимума устойчивости при крене θ 10-12° (рис. 4, 2с), а

дерево с вертикальной корневой системой наклоняется почти на 30° , но еще не достигает максимума устойчивости. В этой ситуации малейшее увеличение крена или усиление ветра приведет к опрокидыванию дерева с горизонтальной корневой системой, так как кренящий момент будет все время больше момента устойчивости. Для дерева с вертикальной корневой системой положение $2b$ является устойчивым, неустойчивость же для него появляется при увеличении силы ветра до 3 , в точке $3b$, т.е. при углах крена $40-50^\circ$.

Итак, устойчивыми являются левые ветви кривых восстанавливающих моментов, когда эти моменты растут с ростом крена (рис. 4). Достаточно подробные расчеты приведены, например, в монографии Дж. Норвуда [5], в которой даются расчеты устойчивости катамарана с классическим парусным вооружением и катамарана с пирамидальными парусами, когда два паруса натянуты на противоположных гранях пирамиды, а мачта есть высота этой четырехгранной пирамиды. Пирамидальные паруса - хорошая модель кроны с учетом ее ажурности и способности ветвей и листьев разворачиваться по ветру. Для характеристики формы кроны можно использовать такой показатель, как удлинение - отношение площади квадрата со стороной, равной протяженности кроны, к площади проекции кроны на плоскость, перпендикулярную направлению ветра. Для большинства пород деревьев удлинение составляет 3.5-4.5. Интересно отметить, что по Дж. Норвуду наиболее эффективны пирамидальные паруса с удлинением порядка трех.

Деревья с горизонтальной корневой системой должны выдерживать без существенного крена ветры большей силы, чем деревья с вертикальной корневой системой. Но при достижении критической силы ветра деревья - "катамараны" резко теряют устойчивость и вываливаются с корнями. Такая реакция деревьев на ветровое воздействие может наблюдаться на горных склонах, где жесткая подстилающая поверхность приводит к горизонтальному расположению корней [13, 15].

Деревья с вертикальной корневой системой, аналогичные по характеру своей ветровой устойчивости швертботу, могут сохранять устойчивость при больших углах крена, чем деревья с горизонтальным расположением корней, однако такие деревья под ветровым воздействием будут сильнее изгибаться и у них существенно возрастает вероятность излома ствола (в настоящей работе подобные эффекты детально не анализируются).

Восстанавливающий момент как произведение массы на плечо приложения силы пропорционален характерному размеру L^4 , а аэродинамический кренящий момент как произведение площади парусности кроны на высоту центра давления пропорционален L^3 , т.е. на порядок

меньшей величине. Поэтому у деревьев больших размеров устойчивость сохраняется при большей площади проекции кроны в расчете на единицу массы дерева, чем у деревьев малых размеров.

Таким образом, обе рассмотренных модели показывают, что устойчивое равновесие дерева возможно вплоть до критической силы ветрового воздействия. Эта критическая сила является порогом потери устойчивости и связана с величиной эйлеровой нагрузки.

Как показано выше, устойчивость дерева во многом определяется типом его корневой системы. Корневая система дерева, растущего на почве с жесткой подстилающей поверхностью (скальное основание на горном склоне, слой глины и т.п.), развивается в условиях взаимодействия корня с препятствиями. При этом растущий корень будет находиться под действием силы реакции со стороны препятствия, в нем будут нарастать напряжения и возможно появление неустойчивости относительно изгибов [9, 10, 14].

С одной стороны, потеря устойчивости растущего корня при встрече с препятствием приводит к его искривлению, а в дальнейшем - к переходу корневой системы от вертикального к горизонтальному типу и соответствующему изменению устойчивости дерева к ветру. С другой стороны, если по каким-либо причинам происходит искривление корня, то это приводит к появлению своеобразного пружинного подвеса у дерева, что уменьшает колебания корня под действием ветровой нагрузки у дерева и способствует изменению ветроустойчивости дерева в зависимости от жесткости закрепления.

Если дерево рассматривать как консоль с упругим закреплением, находящуюся под действием поперечной нагрузки, то для такой консоли при уменьшении величины параметра закрепления возможен большой прогиб части консоли, находящейся у точки закрепления [7]. Если же происходит быстрое и резкое нарастание силы ветра до ураганной, то возможен изгиб ствола дерева как консоли навстречу действующей силе [3] на так называемом втором пороге потери устойчивости [1, 4]. В связи с этим при резких шквалистых ветрах теоретически возможны эффекты обрушивания сломанного дерева на свой пень или выпадения деревьев против направления ветра. Желательно обратить внимание лесоводов на возможность существования таких эффектов и учет их.

УСТОЙЧИВОСТЬ ДЕРЕВЬЕВ В ДРЕВОСТОЕ К ВЕТРОВОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

Задача оценки устойчивости всего насаждения к ветру не сводится к задаче оценки ветроустойчивости одиночного дерева в связи с тем, что ветроустойчивость насаждения в целом не есть сум-

ма показателей ветроустойчивости отдельных деревьев. При оценке ветроустойчивости всего насаждения необходимо принимать во внимание кооперативные эффекты сопротивления деревьев ветровому воздействию, степень проявления которых зависит от взаимного расположения деревьев, густоты насаждения, различия в высотах и размерах крон деревьев.

Древостой в целом для защиты от ветра использует кооперативный эффект сопротивления, связанный с тем, что при достаточной густоте насаждения кроны деревьев соприкасаются и перекрывают друг друга. Такие "сцепленные" деревья обладают высокой ветроустойчивостью. Опасность вывала деревьев увеличивается при интенсивном самоизреживании древостоя или после рубок разного типа, ведущих к появлению в лесу полян, просек и прогалин.

С точки зрения ветроустойчивости можно рассматривать два модельных типа одноярусных насаждений. Первый из этих типов - загущенные насаждения с сильным перекрытием крон деревьев. Второй модельный тип - сильно разреженные насаждения с большим расстоянием между деревьями.

Насаждение первого типа - загущенное - можно рассматривать как предельно устойчивое к воздействию ветра. Так как в уравнение для ветроустойчивости одиночного дерева входят параметры, характеризующие размеры корневой системы, то с точки зрения введенной выше модели одиночного дерева такое насаждение можно считать одиночным деревом с размерами корневой системы, равными или большей площади древостоя, поскольку у отдельного дерева размеры корневой системы обычно превосходят площадь проекции кроны.

Насаждения же второго типа - предельно разреженные - можно в пределе рассматривать как сумму одиночных деревьев, у которых кооперативный эффект защиты от ветрового воздействия не выражен в связи с низким уровнем смыкания крон, малой густотой насаждения и т.п. Устойчивость деревьев в таком насаждении можно рассматривать, исходя из модели устойчивости одиночного дерева.

Для оценки устойчивости к ветру насаждений промежуточных типов, когда насаждение, с одной стороны, не предельно загущено, но, с другой - не может рассматриваться как насаждение второго типа, рассмотрим модель насаждения, в котором деревья имеют одинаковую высоту и размеры крон, а кооперативные эффекты ветроустойчивости связаны с взаимным расположением деревьев.

Пусть радиус горизонтальной проекции кроны дерева в таком насаждении есть R , а координата отдельного i -го дерева на пробной площади характеризуется величинами X_i и Y_i . В этом случае расстояние L между произвольными i -м и j -м де-

ревьями равно $L_{ij} = [(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2]^{1/2}$. Если для двух произвольных деревьев $L_{ij} < 2R$, то кроны этих деревьев перекрываются. Перекрытие крон способствует проявлению кооперативного эффекта ветроустойчивости, поэтому, чем больше доля деревьев с перекрывающимися кронами и чем выше степень перекрытия, тем устойчивее данное насаждение к ветру. Таким образом, в данном случае оценку устойчивости насаждения можно получить, исходя из оценки устойчивости одиночного дерева, с дополнительным коэффициентом, характеризующим кооперативный эффект сопротивления ветру. Этот коэффициент будет зависеть от степени перекрытия крон деревьев. Для предельно загущенного насаждения доля деревьев с перекрывающимися кронами будет максимальной. Для предельно изреженного насаждения доля деревьев с перекрывающимися кронами будет минимальной.

Переформулируем теперь задачу оценки ветроустойчивости насаждения как задачу окружностей в теории протекания [11]. В задаче окружностей рассматриваются окружности с радиусом R , координаты которых X и Y есть равномерно распределенные случайные числа ($0 \leq X \leq X_0$; $0 \leq Y \leq Y_0$; $X_0, Y_0 \gg R$; здесь X_0, Y_0 - размеры участка на плоскости, где размещены эти окружности). Среднее число центров окружности на единицу площади участка, т.е. плотность (густота) размещения окружностей равно N . Две окружности считаются связанными друг с другом (охватывающими), если центр одной окружности находится внутри другой. Если окружность 1 связана с окружностью 2, а окружность 2 связана с окружностью 3, то считается, что окружность 1 связана с окружностью 3.

Совокупность связанных таким образом деревьев назовем кластером. При достаточной густоте деревьев в насаждении и достаточных размерах горизонтальных проекций крон определенная доля деревьев будет принадлежать одному кластеру. Для каждого дерева можно ввести показатель n - число связей с соседними деревьями.

Будем считать, что на плоскости наблюдается эффект протекания в определенном направлении, если начав с дерева с наименьшим значением координаты по этому направлению, можно, перемещаясь по связанным друг с другом окружностям, дойти до дерева с наибольшим значением координаты по данному направлению. Задача окружностей состоит в том, чтобы найти критическое значение плотности, при котором возникает протекание по охватывающим окружностям, т.е. возникает бесконечный кластер связанных друг с другом окружностей [11]. Параметром, определяющим возможность протекания по охватывающим окружностям, является величина

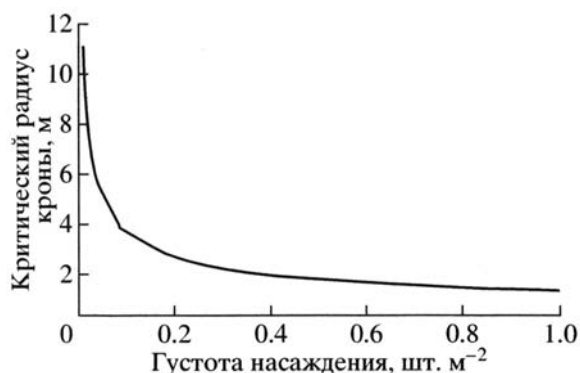


Рис. 5. Связь между густотой насаждения и критическим радиусом кроны.

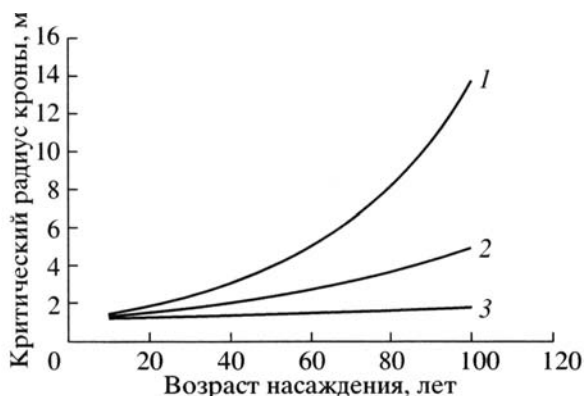


Рис. 6. Изменение с возрастом насаждения величины критического радиуса кроны деревьев: 1 - коэффициент самоизреживания $\alpha = 0.05$; 2 - коэффициент самоизреживания $\alpha = 0.03$; 3 - коэффициент самоизреживания $\alpha = 0.01$.

B - среднее число центров соседних окружностей, находящихся внутри одной окружности,

$$B = \pi NR^2. \quad (5)$$

Действительно, если B мало, то мало и число связанных друг с другом окружностей. При большом B внутри одной окружности размещено большое число центров других окружностей и вероятность возникновения бесконечного проводящего кластера велика.

Для задачи окружностей известно, что критическое значение B_c , при котором возникает проводящий кластер, равно 4.1 ± 0.4 [11]. Для задачи ветроустойчивости это означает, что для того, чтобы древостой был устойчив к ветру, необходимо, чтобы деревья в древостое соприкасались кронами в среднем с четырьмя соседями. Подставляя значение B_c в (5), получим, что между густотой насаждения и критической величиной R_c радиуса горизонтальной проекции кроны, при котором в насаждении появляется единый проводящий кластер и возникают кооперативные эффек-

ты сопротивления ветру, имеет место следующая зависимость (рис. 5)

$$R_c = 1.14/\sqrt{N}. \quad (6)$$

Если густота насаждения (число деревьев на единицу площади) равно N , то среднее расстояние между деревьями $\lambda = 1/\sqrt{N}$. Таким образом, из (6) следует, что критический радиус горизонтальной проекции кроны дерева у ветроустойчивых насаждений на 14% больше, чем среднее расстояние между деревьями. Следует заметить, что этот результат не зависит от абсолютных значений радиусов горизонтальных проекций кроны деревьев.

Задачу окружностей можно рассмотреть и с другой точки зрения. Будем рассматривать лес с прогалинами радиусом Q со средней плотностью прогалин U . Тогда возникновение эффекта протекания в таком образом сформулированной задаче окружностей соответствует в насаждении ситуации, когда ветер беспрепятственно проникает в глубь насаждения. Для критического радиуса прогалины Q_c получим выражение, аналогичное выражению (6),

$$Q_c = 1.14/\sqrt{U}. \quad (7)$$

Из (7) следует, что рубки разного типа, при которых число прогалин (т.е. их плотность U) увеличиваются, приводят к уменьшению критического радиуса прогалины Q_c и, следовательно, к уменьшению ветроустойчивости насаждений.

Если рассматривать процесс естественного самоизреживания древостоя, то в ходе этого процесса густота насаждения уменьшается, а размеры кроны деревьев увеличиваются. Это приводит, естественно, к изменению во времени значения B . Интенсивность самоизреживания можно описать функцией $N(t) = N(0)\exp(-\alpha t)$ [8]. Тогда изменение во времени критического радиуса кроны деревьев будет выражаться следующим образом:

$$R_c(t) = 1.14/\sqrt{N(t)} = 1.14/\sqrt{N(0)\exp(-\alpha t)}. \quad (8)$$

Для древостоев в таежных лесах коэффициент самоизреживания α изменяется в пределах 0.01-0.05 [8]. Для случая $\alpha = 0.05$ это означает, что, если в 20-летнем возрасте густота хвойных насаждений составляет примерно 1 дерево на 1 м^2 , то к 70 годам густота насаждения уменьшается до 0.08 деревьев на 1 м^2 .

На рис. 6 приведена кривая изменения во времени критического радиуса кроны деревьев для некоторых значений коэффициента самоизреживания. На рис. 6 видно, что при $\alpha = 0.05$ для сохранения в процессе развития древостоя ветроустойчивости насаждения необходимо, чтобы радиус кроны деревьев достигал как минимум 10 м. Для большинства хвойных пород это условие не выполняется, и можно говорить о том, что ветроустойчивость таких

насаждений с возрастом уменьшается. Для насаждения с коэффициентом самоизреживания $\alpha = 0.01$ критический радиус кроны с возрастом изменяется мало (рис. 6, 3). Для $\alpha = 0.03$ критический радиус с возрастом растет (рис. 6, 2). Наконец, для насаждений с коэффициентом самоизреживания $\alpha = 0.05$ (рис. 6, 1) ветроустойчивость насаждения с возрастом сильно уменьшается.

Заключение. Рассмотренные модели ветроустойчивости одиночного дерева и насаждения показывают, что устойчивость дерева к ветровому воздействию определяется как геометрией дерева (его высотой, размерами кроны), так и характеристиками корневой системы. При оценке же устойчивости насаждения возможно использовать обобщенные показатели, характеризующие структуру древостоя, такие, как средний радиус крон, густота насаждения, радиус и средняя плотность прогалин, коэффициент самоизреживания насаждения.

Характеристики ветроустойчивости реальных деревьев и древостоев, естественно, будут отличаться от модельных характеристик ветроустойчивости, описанных в настоящей работе. Для оценки ветроустойчивости реальных насаждений необходимо использовать численные методы расчетов на основе данных о местоположении деревьев в насаждении, характеристиках крон, стволов и корней деревьев. Однако получение в полном объеме таких данных требует значительных усилий и времени. Качественные же эффекты воздействия ветра на деревьях и насаждения вполне возможно описать с помощью изложенных выше моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Захаров Ю.В.* Статическая и динамическая потеря устойчивости ферромагнитного слоя при перемагничивании // Докл. АН. 1995. Т. 344. № 3. С. 328-332.
2. *Захаров Ю.В., Суховольский В.Г.* Устойчивость деревьев к воздействию ветра и оценка опасности ветровала в насаждениях // Проблемы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. Красноярск: Ин-т вычисл. модел. СО РАН, 1997. С. 178-182.
3. *Захаров Ю.В., Охоткин К.Г.* Нелинейный изгиб тонких упругих стержней // Прикл. механика и тех. физика. 2002. Т. 43. № 5. С. 124-131.
4. *Лаврентьев М.А., Ишлинский А.Ю.* Динамические формы потери устойчивости упругих систем // Докл. АН СССР. 1949. Т. 64. № 6. С. 779-782.
5. *Норвуд Дж.* Быстроходные парусные суда. Л.: Судостроение, 1983. 104 с.
6. *Пановко Я.Г., Губанова И.И.* Устойчивость и колебания упругих систем. М.: Наука, 1979. 384 с.
7. *Филенкова Н.В., Суховольский В.Г., Захаров Ю.В.* Устойчивость упругозакрепленной консоли и колонны на упругом основании под действием поперечной нагрузки // Решетневские чтения. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмический ун-т, 2002. С. 78.
8. *Хильми Г.Ф.* Теоретическая биогеофизика леса. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 205 с.
9. *Штейн А.А.* Деформирование стержня из растущего биологического материала, подвергнутого продольному сжатию // Прикл. математика и механика. 1995. Т. 59. № 1. С. 149-154.
10. *Штейн А.А.* Взаимодействие вертикально растущего корня с жестким препятствием // Биофизика. 1996. Т. 41. № 5. С. 1097-1101.
11. *Эфрос А.* Физика и геометрия беспорядка. М.: Наука, 1985. 125 с.
12. *Craemer H.* Die Beurteilung der Kippsicherheit von Stützmauern als Labilitäterscheinung // Zement. 1936. № 4. P. 52-56.
13. *Sprugel D.G., Borman F.H.* Natural disturbance and the steady state in high altitude balsam fir forest // Science. 1981. № 211. P. 390-393.
14. *Whitely G.M., Hewitt J.S., Dexter A.R.* The buckling of plant root // Physiol. Plant. 1982. V. 54. P. 333-342.
15. *Zakharov Yu.V., Soukhovolsky V.G.* A mathematical model of tree root forms and estimation of effects on decreasing windfall risk // Disturbance in boreal forest ecosystem: human impacts and natural processes. Proc. Intern. Boreal Forest Research Association 1997 annual meeting. St. Paul, Minnesota: U.S. Department of Agriculture, 2000. P. 211-218.

Models of Wind Resistance of Trees and Stands

Yu. V. Zakharov and V. G. Suokhovolsky

Mathematical models describing the influence of wind on individual trees and stands are proposed. Effects of wind on trees and stands are shown to be specified by the type of tree root system, crown size, and the pattern of spatial distribution of trees in a stand.