

УДК 630*421:614.8

МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ ЛЕСНЫХ МАССИВОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК**Рибко Д.В., Камлюк А.Н., Борисевич С.А.**

Проведен обзор двух механико-эмпирических моделей HWIND и GALES, используемых в настоящее время для определения ветровой нагрузки на деревья и скорости ветра, при которой произойдет выворот деревьев или повреждение стволов. В модели GALES вычисляется аэродинамическая шероховатость и смещение нулевой плоскости лесных насаждений. Обе величины позволяют подсчитать действующий на дерево изгибающий момент для любой скорости ветра и предсказать скорость ветра, при которой произойдет выворот дерева или повреждение его ствола. В модели HWIND момент, возникающий от ветровой нагрузки на крону дерева, вычисляется из предположения, что профиль скорости ветра имеет логарифмический характер. Прочность на изгиб ствола дерева и момент сопротивления корневой системы опрокидыванию дерева находятся на основании эксперимента, что позволяет рассчитать скорость ветра необходимую для выворота дерева и разрушения ствола. Проведено сравнение двух моделей и указано направление их усовершенствования.

Ключевые слова: ветровая нагрузка; выворот деревьев; повреждение ствола; критическая скорость ветра; опасное напряжение; изгибающий момент.

(Поступила в редакцию 14 июля 2017 г.)

Введение. Ветер – наиболее характерное природное явление по повторяемости в зависимости от времени года. Часто причиной повреждения линий электропередач, имущества людей, зданий и сооружений является упавшее от воздействия сильного ветра дерево. Понимание процесса взаимодействия ветра с лесными массивами, устойчивости лесных насаждений к повреждению сильным ветром, исследование потенциала для превентивных мер, направленных на защиту насаждений, имеют важное значение в обеспечении безопасности жизни и здоровья людей.

Ветер – один из главных разрушающих природных факторов для европейских лесов и на его долю приходится более чем 50 % всех повреждений лесов по объему [1, 2]. Вызывает беспокойство тот факт, что уровень повреждения лесов, вызванный этим фактором, увеличивается на протяжении последнего столетия [1] и, очевидно, будет увеличиваться в дальнейшем [2, 3]. Отчасти это увеличение связано с изменением климата, однако во многом с существующей практикой ведения лесного хозяйства [4, 5, 6].

В настоящее время разработано несколько методов для оценки повреждения насаждений ветром. Один из методов заключается в исследовании эмпирической модели полученной на основании исследования последствий сильного ветра. Эта модель требует большого количества точных данных с места, где произошло повреждение насаждений, и может использоваться для прогнозирования последствий только для того места, где эти данные получены. Примером является модель «Lothar», которая была создана на основании изучения около 1300 мест повреждения леса на юго-западе Германии в 1999 году [7].

Другой подход заключается в использовании гибридных механико-эмпирических моделей, таких как HWIND [8], FOREOLE [9], и GALES [10], в которые закладывается как можно больше инженерных расчетов для определения ветровой нагрузки на деревья и скорости ветра, при которой произойдет выворот деревьев или повреждение стволов. Модели называются гибридными, так как некоторые их элементы не могут быть вычислены только на основании механического подхода, но также требуют эмпирических зависимостей. Например, при вычислении сопротивления деревьев вывороту используется эмпирическая зависимость между размером дерева, типом почвы и глубиной залегания корней [11]. Эти гибридные механико-эмпирические модели используют характеристики древостоя и места произрастания для нахождения критической скорости ветра, вызывающей повреждение деревьев. Ярким примером является модель ForestGALES [12], которая использует GALES для нахождения критической скорости ветра и использует статистические данные о скорости ветра в заданной местности для подсчета вероятности повреждения лесных насаждений, основываясь на характеристиках ландшафта и вида насаждения. Эта модель использует разделение общего импульса, передаваемого ветром на отдельные деревья в лесу [13], и

коэффициент порыва ветра для преобразования величин ветровой нагрузки от среднего значения к максимальной. Модель ForestGALES рекомендована для использования в Великобритании в качестве системы поддержки принятия решений при оценке риска повреждений от ураганов в лесах коммерческого значения [14]. Она также была принята для использования в Бразилии, Канаде, Дании, Франции, Японии и Новой Зеландии [15-20]. На основании этой модели создано специальное программное обеспечение, рассчитывающее критическую скорость ветра.

Рассмотрим наиболее часто используемые для расчетов модели HWIND и GALES. Базовая структура методов очень похожа и представлена на схеме 1. Главное отличие заключается в том, что модель GALES создана для расчета критической скорости ветра в глубине насаждений, а модель HWIND для деревьев, произрастающих на краю насаждений или одиночно стоящих.

Модель GALES. В данной модели ветровая нагрузка на деревья рассчитывается с использованием зависимости между силой, с которой воздух действует на поверхность, и аэродинамической шероховатостью поверхности. Скорость ветра v над насаждением задается логарифмическим профилем скоростей, и записывается следующим образом:

$$v(z) = \frac{v_*}{k} \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right), \quad (1)$$

где z – высота над поверхностью земли (м), v_* – скорость трения (м/с); k – константа Кармана, $k \approx 0,4$; d – смещение нулевой плоскости (м); z_0 – параметр аэродинамической шероховатости (м).

Скорость трения определяется из выражения:

$$\tau = -\rho v_*^2, \quad (2)$$

где τ – сдвиговые напряжения, действующие на поверхность (Н/м²); ρ – плотность воздуха (кг/м³).

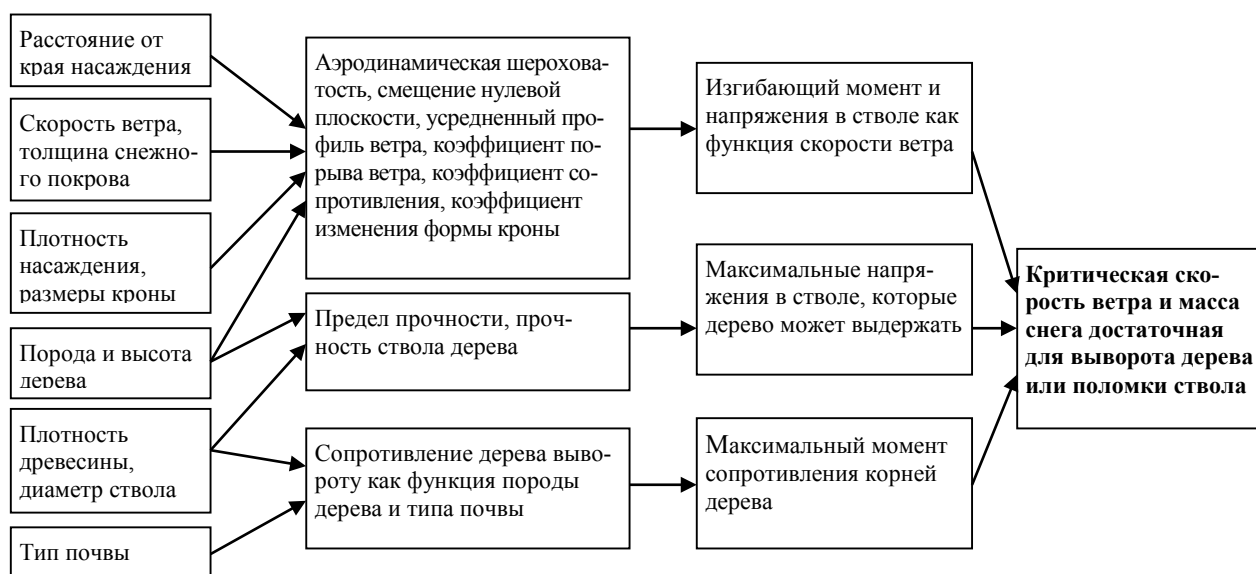


Рисунок 1. – Схема моделей GALES и HWIND

Сдвиговые напряжения представляют собой силу трения, действующую на единицу площади, вызванную действием ветра. Если обозначить через D среднее расстояние между деревьями, то тогда τD^2 будет средней силой, действующей на каждое дерево. Было установлено, что эту силу следует прикладывать на некотором расстоянии d от основания, которое называют смещение нулевой плоскости. В этом случае, среднее значение изгибающего момента в сечениях ствола дерева, можно записать в следующем виде

$$M_{\text{ср}}^{\text{изг}}(z) = (d - z)\tau D^2. \quad (3)$$

Чтобы перейти от среднего значения изгибающего момента к максимальному, необходимо его значение умножить на коэффициент G , учитывающий порывы ветра.

Учитывая (1) и (2), из выражения (3) получим общую формулу для максимального изгибающего момента в любом сечении ствола дерева как функцию скорости ветра над лесом v_h

$$M_{\text{макс}}^{\text{изг}} = f_{cw} f_{\text{edge}} (d - z) \rho G \left(\frac{D v_h k}{\ln \left(\frac{h - d}{z_0} \right)} \right), \quad (4)$$

где h – высота дерева (м); f_{cw} – коэффициент, учитывающий дополнительный момент, возникающий в случае неравномерности кроны; f_{edge} – коэффициент, учитывающий расположение дерева по отношению к краю насаждения.

Предполагая, что средняя высота деревьев и расстояние между деревьями известна, для вычисления максимального изгибающего момента у основания дерева, как функции скорости ветра над лесом, нам необходимо знать значения коэффициента учитывающего порывы ветра – G , значение параметра аэродинамической шероховатости z_0 , смещение нулевой плоскости d и коэффициенты f_{cw} и f_{edge} .

Значения коэффициента G получены эмпирически на основании изучения изгибающего момента на моделях деревьев в аэродинамической трубе [21]. Коэффициент получен для ситхинской ели при различных значениях D , как функция расстояния от края леса до модели.

Значение параметра аэродинамической шероховатости z_0 и смещение нулевой плоскости d находятся по методике, изложенной в работе [22], в которой деревья представляются в виде цилиндров с высотой равной высоте дерева и шириной равной фронтальной площади кроны дерева.

Расчет на прочность ствола дерева основан на предположении что если напряжения на высоте $z = 1,3$ м (на уровне груди) превышают предел прочности древесины, то произойдет разрушение ствола. Критический изгибающий момент рассчитывается по формуле:

$$M_{\text{крит}} = \frac{\pi}{32} f_{\text{knot}} \cdot MOR \cdot d_{bh}^3, \quad (5)$$

где MOR – предел прочности древесины (Па); d_{bh} – диаметр ствола на уровне груди, $z = 1,3$ м (м).

Когда изгибающий момент, рассчитанный на основании выражения (3) (при $z = 1,3$ м), и выражения (5) совпадают, то скорость ветра над насаждением достаточна для повреждения ствола дерева. Из этого условия получаем зависимость для критической скорости ветра:

$$v(h)_{\text{кр}}^{\text{излома}} = \frac{1}{kD} \left(\frac{\pi \cdot MOR \cdot d_{bh}^3}{32 \rho G (d - 1,3)} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{f_{\text{knot}}}{f_{cw}} \right)^{\frac{1}{2}} \ln \left(\frac{h - d}{z_0} \right). \quad (6)$$

Сопротивление деревьев вывороту рассчитывается на основе экспериментов по выворачиванию деревьев с помощью лебедки, проведенных на более чем 2000 деревьев, выполненных Лесной комиссией Великобритании [23]. Для некоторых хвойных пород на различных типах почвы к деревьям прикладывалась сила с помощью лебедки, закрепленной к середине ствола. Во время эксперимента замерялась сила, необходимая для выкорчевывания дерева, и подробно исследовались физические характеристики дерева. Для каждой породы были получены зависимости между максимальным моментом у основания ствола и различными физическими характеристиками дерева, такими как глубина залегания корней, вес корней, вес ствола и их комбинациями. Наилучшую аппроксимацию данных получили в виде линейной зависимости между максимальным моментом у основания ствола и весом дерева – SW (кг). Т. е. для всех комбинаций деревьев и типов почв, для которых были получены данные, момент необходимый для выворота деревьев можно определить по формуле:

$$M_{\text{крит}}^{\text{выворот}} = C_{\text{рег}} \cdot SW, \quad (7)$$

где $C_{\text{рег}}$ (Н·м/кг) – константа, полученная эмпирическим путем.

Для тех пород деревьев и типов почв, для которых отсутствуют данные, расчеты проводятся на основании характеристик деревьев аналогичных по своим свойствам.

Когда изгибающий момент, рассчитанный на основании выражения (3) (при $z = 0$), и выражения (7) совпадают, то выражение для скорости ветра над уровнем леса для выворота деревьев будет иметь вид:

$$v(h)_{\text{кр}}^{\text{вывор}} = \frac{1}{kD} \left(\frac{C_{reg} \cdot SW}{\rho G d} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{f_{cw}} \right)^{\frac{1}{2}} \ln \left(\frac{h - d}{z_0} \right). \quad (8)$$

Уравнения (6) и (8) можно решить только в случае если фронтальная площадь кроны дерева не является функцией скорости ветра. Очевидно, что при увеличении скорости ветра, фронтальная площадь кроны уменьшается, а, следовательно, изменяются значения d и z_0 . Поэтому уравнения решаются итеративным методом. Задают начальное значение скорости ветра и по формуле (4) находят максимальный изгибающий момент в соответствующем сечении ствола дерева (у основания ствола, для выворота деревьев, и на высоте $z = 1,3$ м, для разрушения ствола). Если полученное значение отличается от изгибающих моментов, необходимых для выворота деревьев, или разрушения ствола, рассчитанных по формулам (5) и (7), скорость ветра увеличивают, если скорость ветра слишком низкая, или уменьшают, если скорость слишком высокая. Процедуру выполняют до тех пор, пока величины изгибающих моментов не совпадут с заданной точностью.

Модель HWIND. Подробное описание модели дано в работе [8]. Силы, действующие на дерево, разделяются на горизонтальные, вызванные ветром и вертикальные, обусловленные силами тяжести, включающие вес ствола дерева, вес кроны, вес снега. Среднюю ветровую нагрузку на каждой высоте в насаждении вычисляют, используя предсказанный профиль скоростей. Нагрузки, обусловленные силами тяжести, вычисляют, используя вертикальное распределение масс ствола и кроны дерева.

Суммарная средняя нагрузка, вызванная ветром, представляет собой сумму сил, действующих на каждую точку ствола и кроны, определяется:

$$F_1(z) = \frac{1}{2} C_d v(z)^2 A(z), \quad (9)$$

где $v(z)$ – средняя скорость на высоте z (м/с); A – фронтальная площадь ствола и кроны (м^2), C_d – коэффициент сопротивления.

Профиль скоростей предполагается логарифмическим и рассчитывается по формуле (1) в предположении $d = 0$. Фронтальная площадь кроны рассчитывается из предположения, что она имеет форму какой-либо простой фигуры (например, треугольник). Изменение площади кроны в результате действия ветра учитывается коэффициентом.

Дополнительный изгиб, вызванный силами тяжести, получают путем деления ствола и кроны на сегменты и суммируя силы, действующие на каждый сегмент

$$F_2(z) = m(z)g, \quad (10)$$

где $m(z)$ – масса ствола и кроны (кг); g – ускорение свободного падения ($\text{м}/\text{с}^2$).

Вклад сил, действующих на каждый сегмент, в максимальный момент у основания ствола определяется по формуле:

$$M_{\text{макс}}^{\text{изгба}}(z) = G(F_1(z)z + F_2x(z)), \quad (11)$$

где z – вертикальная координата, $x(z)$ – горизонтальное смещение центров масс сегментов от первоначального положения.

Коэффициент, учитывающий порывы ветра G , определяется аналогично, как и в модели GALEs.

Общий максимальный момент у основания ствола рассчитывается как сумма вкладов всех сегментов:

$$M_{\text{макс}}^{\text{изг}} = \sum_{z=0}^h M_{\text{макс}}^{\text{изг}}(z). \quad (12)$$

Формулы для изгибающего момента записаны для дерева, произрастающего у края насаждения. Для того чтобы перейти к моменту внутри насаждения, вводят дополнительный коэффициент f_{edge} , как и в модели GALEs.

Зная максимальный изгибающий момент (12) можно найти напряжения у основания ствола дерева. Дерево разрушится, если напряжения будут превышать предельно допустимые для древесины.

Выворот дерева произойдет, если максимальный момент у основания превысит момент сопротивления, обеспеченный корнями и почвой и рассчитывается по формуле:

$$M_{\text{макс}}^{\text{выворот}} = \frac{gR_{\text{mass}}R_{\text{depth}}}{f_{RW}}, \quad (13)$$

где R_{mass} – масса корней и земли между ними (кг); R_{depth} – средняя глубина залегания корней (м); f_{RW} – безразмерный коэффициент, который находится эмпирическим путем.

Расчеты начинают со скорости ветра 1 м/с, находят максимальный изгибающий момент в нужном сечении ствола дерева (у основания ствола, для выворота деревьев, и на высоте $z = 1,3$ м, для разрушения ствола) из уравнения (12). Если момент недостаточен для разрушения или выворота дерева, то скорость ветра увеличивают на 0,1 м/с и расчет повторяют. Скорость увеличивают до тех пор, пока момент не станет достаточным для разрушения или выворота дерева.

Заключение. Как видно из рассмотренных выше уравнений, большинство коэффициентов, входящих в них, зависят от региона, для которого определяется критическая скорость ветра. Т. е. их использование допускается при наличии исследований в той местности, для которой необходимо ее определить. Использование данных моделей для предсказания последствий сильного ветра в Беларуси возможно только после основательных исследований многих региональных особенностей лесных насаждений.

Обзор современной литературы показал, что основное внимание исследователей направлено на исследование устойчивости хвойных насаждений, для которых найдены все необходимые для моделей коэффициенты. Для лиственных пород исследования практически отсутствуют.

Ряд важных вопросов остается нерешенным. Например, использовать модель HWIND невозможно, не зная коэффициентов сопротивления деревьев при обтекании их воздухом. Несмотря на то, что ветровая нагрузка была измерена для небольших деревьев (1,5–2 м) или их частей в аэродинамической трубе [24–26], деревья реальных размеров до сих пор не исследованы ввиду очевидных экспериментальных трудностей. В работе [27] предложен метод для определения коэффициентов сопротивления деревьев различных пород и размеров, основанный на сопоставлении результатов эксперимента и численного моделирования падения дерева и найден коэффициент сопротивления кроны сосны. Данные для других пород отсутствуют. Многие экспериментальные величины получены для одной породы дерева, но используются для всех остальных. В настоящее время проводятся исследования по уточнению моделей и сопоставлению результатов полученных на основании разных моделей [28–32], но данные, которые в этих работах получены, относятся к конкретной породе деревьев или конкретному региону и не могут использоваться для оценки риска на территории Республики Беларусь.

На основании вышесказанного, следует заключить, что существует необходимость адаптировать и усовершенствовать рассмотренные модели для дальнейшего их использования для оценки критической скорости ветра для насаждений на территории Республики Беларусь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schelhaas, M.-J. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries / M.J Schelhaas G.-J. Nabuurs, A. Schuck // *Global Change Biology* – 2003. – Vol. 9, Iss. 11. – Pp. 1620-1633.
2. Gardiner, B. Destructive Storms in European Forests: Past and Forthcoming Impacts. Final report to European Commission / B. Gardiner, K. Blennow, J.-M. Carnus, P. Fleischer, F. Ingemarson, G. Landmann, M. Lindner, M. Marzano, B. Nicoll, C. Orazio, J.-L. Peyron, M.-P. Reviron, M.-J. Schelhaas, A. Schuck, M. Spielmann, T. Usbeck // *DG Environment* – 2010. – Pp. 12-30.
3. Schelhaas, M.-J. Assessing risk and adaptation options to fires and windstorms in European forestry / M.-J. Schelhaas, G. Hengeveld, M. Moriondo. G.J. Reinds, Z.W. Kundzewicz, H. terMaat, M. Bindi // *Mitig Adapt Strateg Glob Change*. 15. – Pp. 681-701.
4. Albrecht, A. How does silviculture affect storm damage in forests of south-western Germany? Results from empirical modeling based on long-term observations / A. Albrecht, M. Hanewinkel, J. Bauhus, U. Kohnle // *Eur J Forest Res* – 2012. – Vol. 131. – Pp. 229-247.

5. Gardiner, B. The stability of different silvicultural systems: a wind-tunnel investigation / B. Gardiner, B. Marshall, A. Achim, R. Belcher, C. Wood // *Forestry* – 2005. – Vol. 78, No. 5. – Pp. 471-484.
6. Valinger, E. Factors affecting the probability of windthrow at stand level as a result of Gudrun winter storm in southern Sweden / E. Valinger, J. Fridman // *Forest Ecology and Management* – 2010. – Vol. 262. – Pp. 398-403.
7. Schmidt, M. An inventory-based approach for modeling single-tree storm damage – experiences with the winter storm of 1999 in southwestern Germany / M. Schmidt, M. Hanewinkel, G. Kändler, E. Kublin, U. Kohnle // *Canadian Journal of Forest Research* – 2010. – Vol. 40(8). – Pp. 1636-1652.
8. Peltola, H. A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch / H. Peltola, S. Kellomäki, H. Väisänen, and V.-P. Ikonen // *Canadian Journal of Forest Research*. – 1999. – Vol. 29. – Pp. 647-661.
9. Ancelin, Ph. Development of an individual tree-based mechanical model to predict wind damage within forest stands / Ph. Ancelin, B. Courbaud, Th. Fourcaud // *Forest Ecology and Management*. – 2004. – Vol. 203. – Pp. 101-121.
10. Gardiner, B. Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees / B. Gardiner, H. Peltola, S. Kellomaki // *Ecological Modelling*. – 2000. – Vol. 129. – Pp. 1-23.
11. Nicoll, B. Anchorage of coniferous trees in relation to species, soil type, and rooting depth / B. Nicoll, B. Gardiner, B. Rayner, A. Peace // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2006. – Vol. 36. – Pp. 1871-1883.
12. Gardiner, B.A. ForestGALES 2 – a PC-based Wind Risk Model for British Forests. User Guide. Forestry Commission / B.A. Gardiner, J. Suarez, A. Achim, S.E. Hale, B.C. Nicoll // Edinburgh. – 2004.
13. Raupach, M.R. Simplified expressions for vegetation roughness length and zero-plane displacement as functions of canopy height and area index. / M.R. Raupach // *Boundary Layer Meteorology*. – 1994. – Vol. 71. – Pp. 211-216.
14. Forestry Commission, Operational Guidance Booklet No. 9 «Thinning» (Internal Guidance). / Forestry Commission // Edinburgh – 2010.
15. Byrne, K.E. Critical Turning Moments and Drag Equations for British Columbia Conifers. / K.E. Byrne // MSc thesis. University of British Columbia, Vancouver, Canada. – 2005.
16. Cucchi, V. Modelling the windthrow risk for simulated forest stands of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). / V. Cucchi, C. Meredieu, A. Stokes, F. de Coligny, J. Suarez, B. Gardiner // *Forest Ecology and Management* – 2005. – Vol. 213. – Pp. 184-196.
17. Kamimura, K. Developing a decision support approach to reduce wind damage risk e a case study on sugi [*Cryptomeria japonica* (L.f.) D. Don] forests in Japan. / K. Kamimura, B. Gardiner, A. Kato, T. Hiroshima, N. Shiraiishi // *Forestry*. – 2008. – Vol. 81. – Pp. 429-446.
18. Mikklesen, S.K. «Stormfald» : a Further Developed Version of ForestGALES Tested under Danish Conditions. / S.K. Mikklesen // MSc Thesis. University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark. – 2007.
19. Moore, J.R. Assessing the risk of wind damage to plantation forests in New Zealand / J.R. Moore, A.R. Somerville // *N. Z. For.* – 1998. – Vol. 31. – Pp. 25-29.
20. Ruel, J.-C. Estimating windthrow risk in balsam fir stands with the ForestGALES model. / J.-C. Ruel, C.P. Quine, S. Meunier, J. Suarez // *For. Chron.* – 2000. – Vol. 76. – P. 329-337.
21. Gardiner, B.A. Field and wind tunnel assessments of the implications of respacing on tree stability / B.A. Gardiner, G.R. Stacey, R.E. Belcher, C.J. Wood // *Forestry*. – 1997. – Vol. 70 (3). – P. 233-252.
22. Raupach, M.R. Drag and drag partition on rough surfaces / M.R. Raupach // *Boundary Layer Meteorol.* – 1992. – Vol. 60. – Pp. 375-395.
23. Ray, D. The effect of soil water-table depth on root-plate development and stability of Sitka spruce / D. Ray, B.C. Nicoll // *Forestry*. – 1998. – Vol. 71 (2). – P. 169-182.
24. Орлов, С.А. Исследование коэффициента сопротивления элементов кроны кедровой сосны / С.А. Орлов, Л.А. Шрагер // *Вестник Томского государственного университета, Математика и механика*. – 2011. – № 2 (14). – С 103-110.
25. Vollsinger, S. Wind tunnel measurements of crown streamlining and drag relationships for several hardwood species. / S. Vollsinger, S.J. Mitchell, K.E. Byrne, M.D. Novak, M. Rudnicki // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2005. – Vol. 35. – P. 1238-1249.
26. Mayhead, G.J. Some drag coefficients for British forest trees derived from wind tunnel studies / G.J. Mayhead // *Agricultural Meteorology*. – 1973. – Vol. 12. – Pp. 123-130.
27. Борисевич, С.А. Определение сопротивления движению кроны дерева / С.А. Борисевич, А.Н. Камлюк, Д.В. Ребко // *Труды БГТУ, Сер. VI физ.-мат. науки и информ.* – 2013. – № 6 (162) – С. 34-36.

28. Halea, S.E. Comparison and validation of three versions of a forest wind risk model / S.E. Halea, B. Gardinera, A. Peacea, B. Nicolla, Ph. Tylora, St. Pizzirania // *Environmental Modelling & Software*. – June 2015. – Vol. 68. – Pp. 27-41.
29. Dupont, S. A simple wind-tree interaction model predicting the probability of wind damage at stand level / S. Dupont // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 15 August 2016. – Vol. 224. – Pp. 49-63.
30. Locatelli, T. Variance-based sensitivity analysis of a wind risk model – Model behaviour and lessons for forest modelling / T. Locatelli, St. Tarantola, B. Gardiner, G. Patenaude // *Environmental Modelling & Software*. – January 2017. – Vol. 87. – Pp. 84-109.
31. Dupont, S. Wind damage propagation in forests / S. Dupont, D. Pivatoa, Y. Bruneta // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 15 December, 2015. – Vol. 214-215. – Pp. 243-251.
32. Locatelli, T. Modelling wind risk to *Eucalyptus globulus* (Labill.) stands / T. Locatelli, B. Gardiner, St. Tarantola, B. Nicoll, J.-M. Bonnefond, D. Garrigou, K. Kamimura, G. Patenaude // *Forest Ecology and Management*. – 1 April, 2016. – Vol. 365. – Pp. 159-173.

MODELS OF BEHAVIOR OF FORESTS UNDER INFLUENCE OF WIND LOADS

Dmitry Rebko

Andrei Kamluk, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor

State educational establishment «University of civil protection
of the Ministry for emergency situations of the Republic of Belarus», Minsk, Belarus

Sergei Borisevich, Candidate of Technical Sciences

Belarusian State Technological University

Purpose. To analyse two independently mathematical models (GALES and HWIND) for predicting the critical wind speed and turning moment needed to uproot and break the tree stems.

Methods. The GALES model calculates the aerodynamic roughness and zero-plane displacement of a forest stand. The aerodynamic roughness provides a measure of the stress (force: unit area) imposed on the canopy as a function of wind speed and the zero-plane displacement provides a measure of the average height on the tree at which the wind acts. This allows calculation of the bending moment imposed on the tree for any wind speed, as a result is the model to make predictions of the wind speed at which the tree will be overturned and broken. In the HWIND model the turning moment arising from the wind drag on the crown is calculated assuming a logarithmic upwind profile. Based on the sum of wind load and the contribution from the overhanging weight of the stem and branches the total bending moment is calculated. The breaking strength of the stem and the support given by the root-soil plate are calculated from previous experiments.

Findings. This allows calculating the wind speed required to break and overturn the tree.

Application field of research. Forecasting the consequences of emergency situations connected with strong winds.

Conclusion. Models comparisons showed that it is necessary to improve existing models and to develop new ones which will be more accurate.

Key words: wind load; uprooting; stem breakage; critical wind speed; breaking stress; turning moment.

(The date of submitting: July 14, 2017)

REFERENCES

1. Schelhaas M.-J., Nabuurs G.-J., Schuck A. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Global Change Biology*, 2003. Vol. 9, Iss. 11. Pp. 1620-1633.
2. Gardiner B., Blennow K., Carnus J.-M., Fleischer P., Ingemarson F., Landmann G., Lindner M., Marzano M., Nicoll B., Orazio C., Peyron J.-L., Reviron M.-P., Schelhaas M.-J., Schuck A., Spielmann M., Usbeck T. *Destructive Storms in European Forests: Past and Forthcoming Impacts. Final report to European Commission.* DG Environment, 2010. Pp. 12-30.
3. Schelhaas M.-J., Hengeveld G., Moriondo M., Reinds G.J., Kundzewicz Z.W., terMaat H., Bindi M. Assessing risk and adaptation options to fires and windstorms in European forestry. *Mitig Adapt Strateg Glob Change*. 15. Pp. 681-701.
4. Albrecht A., Hanewinkel M., Bauhus J., Kohnle U. How does silviculture affect storm damage in forests of south-western Germany? Results from empirical modeling based on long-term observations. *Eur J Forest Res*, 2012. Vol. 131. Pp. 229-247.
5. Gardiner B., Marshall B., Achim A., Belcher R., Wood C. The stability of different silvicultural systems: a wind-tunnel investigation. *Forestry*, 2005. Vol. 78, No. 5. Pp. 471-484.
6. Valinger E., Fridman J. Factors affecting the probability of windthrow at stand level as a result of Gudrun winter storm in southern Sweden. *Forest Ecology and Management*, 2010. Vol. 262. Pp. 398-403.
7. Schmidt M., Hanewinkel M., Kändler G., Kublin E., Kohnle U. An inventory-based approach for modeling single-tree storm damage – experiences with the winter storm of 1999 in southwestern Germany. *Canadian Journal of Forest Research*, 2010. Vol. 40 (8). Pp. 1636-1652.
8. Peltola H., Kellomäki S., Väisänen H., Ikonen V.-P. A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch. *Canadian Journal of Forest Research*, 1999. Vol. 29. Pp. 647-661.
9. Ancelin Ph., Courbaud B., Fourcaud Th. Development of an individual tree-based mechanical model to predict wind damage within forest stands. *Forest Ecology and Management*, 2004. Vol. 203. Pp. 101-121.

10. Gardiner B., Peltola H., Kellomaki S. Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. *Ecological Modelling*, 2000. Vol. 129. Pp. 1-23.
11. Nicoll B., Gardiner B., Rayner B., Peace A. Anchorage of coniferous trees in relation to species, soil type, and rooting depth. *Canadian Journal of Forest Research*, 2006. Vol. 36. Pp. 1871-1883.
12. Gardiner B.A., Suarez J., Achim A., Hale S.E., Nicoll B.C. *ForestGALES 2 – a PC-based Wind Risk Model for British Forests. User Guide*. Forestry Commission. Edinburgh, 2004.
13. Raupach M.R. Simplified expressions for vegetation roughness length and zero-plane displacement as functions of canopy height and area index. *Boundary Layer Meteorology*, 1994. Vol. 71. Pp. 211-216.
14. *Forestry Commission, Operational Guidance Booklet No. 9 «Thinning» (Internal Guidance)*. Forestry Commission. Edinburgh, 2010.
15. Byrne K.E. *Critical Turning Moments and Drag Equations for British Columbia Conifers*. MSc thesis. University of British Columbia. Vancouver, Canada, 2005.
16. Cucchi V., Meredieu C., Stokes A., de Coligny F., Suarez J., Gardiner B. Modelling the windthrow risk for simulated forest stands of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Forest Ecology and Management*, 2005. Vol. 213. Pp. 184-196.
17. Kamimura K., Gardiner B., Kato A., Hiroshima T., Shiraishi N. Developing a decision support approach to reduce wind damage risk e a case study on sugi [*Cryptomeria japonica* (L.f.) D.Don] forests in Japan. *Forestry*, 2008. Vol. 81. Pp. 429-446.
18. Mikklesen S.K. «*Stormfald*»: a Further Developed Version of *ForestGALES* Tested under Danish Conditions. MSc Thesis. University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark. 2007.
19. Moore J.R., Somerville A.R. Assessing the risk of wind damage to plantation forests in New Zealand. *N. Z. For.*, 1998. Vol. 31. Pp. 25-29.
20. Ruel J.-C., Quine C.P., Meunier S., Suarez J. Estimating windthrow risk in balsam fir stands with the *ForestGALES* model. *For. Chron.*, 2000. Vol. 76. P. 329-337.
21. Gardiner B.A., Stacey G.R., Belcher R.E., Wood C.J. Field and wind tunnel assessments of the implications of respacing on tree stability. *Forestry*, 1997. Vol. 70 (3). P. 233-252.
22. Raupach M.R. Drag and drag partition on rough surfaces. *Boundary Layer Meteorol*, 1992. Vol. 60. Pp. 375-395.
23. Ray D., Nicoll B.C. The effect of soil water-table depth on root-plate development and stability of Sitka spruce. *Forestry*, 1998. Vol. 71 (2). P. 169-182.
24. Orlov S.A., Shrager L.A. Research of the resistance coefficient of cedar pine crown elements. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, Matematika i mekhanika*, 2011. No. 14. Pp. 103–110.(rus)
25. Vollsinger S., Mitchell S.J., Byrne K.E., Novak M.D., Rudnicki M. Wind tunnel measurements of crown streamlining and drag relationships for several hardwood species. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005. Vol. 35. P. 1238-1249.
26. Mayhead G.J. Some drag coefficients for British forest trees derived from wind tunnel studies. *Agricultural Meteorology*, 1973. Vol. 12. Pp. 123-130.
27. Borisevich S.A., Kamluk A.N., Rebko D.V. Opređenje soprotivleniya dvizheniyu krony dereva [Determination of resistance to movement of the crown of a tree]. *Trudy BGTU, Ser.VI fiz.-mat. nauki i inform*, 2013. No. 6 (162) Pp. 34-36.(rus)
28. Halea S.E., Gardinera B., Peacea A., Nicolla B., Taylora Ph., Pizzirania St. Comparison and validation of three versions of a forest wind risk model. *Environmental Modelling & Software*, June 2015. Vol. 68. Pp. 27-41.
29. Dupont S. A simple wind-tree interaction model predicting the probability of wind damage at stand level. *Agricultural and Forest Meteorology*, 15 August 2016. Vol. 224. Pp. 49-63.
30. Locatelli T., Tarantola St., Gardiner B., Patenaude G. Variance-based sensitivity analysis of a wind risk model – Model behaviour and lessons for forest modelling. *Environmental Modelling & Software*, January 2017. Vol. 87. Pp. 84-109.
31. Duponta S., Pivatoa D., Bruneta Y. Wind damage propagation in forests. *Agricultural and Forest Meteorology*. 15 December, 2015. Vol. 214-215. Pp. 243-251.
32. Locatelli T., Gardiner B., Tarantola St., Nicoll B., Bonnefond J.-M., Garrigou D., Kamimura K., Patenaude G. Modelling wind risk to *Eucalyptus globulus* (Labill.) stands. *Forest Ecology and Management*. 1 April, 2016. Vol. 365. Pp. 159-173.