

УДК 532.3:533.6

С. А. Борисевич

Белорусский государственный технологический университет

**СИЛОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КРОНЫ ДЕРЕВА
С ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ**

В работе показано, что в существующих экспериментальных исследованиях по определению силы сопротивления, действующей на крону дерева при обтекании ее воздушной средой, сила сопротивления прямо пропорциональна скорости обтекания. При увеличении скорости обтекания кроны воздухом в результате ее реконфигурации изменяются фронтальная проекция кроны и безразмерный коэффициент сопротивления. Однако их произведение, умноженное на скорость обтекания, остается постоянным при любой скорости обтекания, откуда следует, что зависимость для силы сопротивления линейна по скорости. Для доказательства этого утверждения проведен натурный эксперимент по свободному падению спиленного дерева и численное моделирование этого процесса. В результате сопоставления итогов для пяти экспериментов установлено, что линейная зависимость для силы сопротивления с постоянным коэффициентом перед скоростью позволяет точно описать динамическое поведение реального дерева в любой момент времени. На основании численного эксперимента установлено, что коэффициенты сопротивления для кроны сосны высотой 23–27 м находятся в диапазоне 48,0–75,4 кг/(м·с). В результате сделано заключение, что нет необходимости использовать сложную квадратичную по скорости зависимость для силы сопротивления с переменными значениями для фронтальной проекции кроны и коэффициента сопротивления, а использовать простую линейную по скорости зависимость с постоянным коэффициентом сопротивления, величина которого подлежит предварительному определению.

Ключевые слова: крона дерева, сила сопротивления, фронтальная проекция кроны, коэффициент сопротивления.

S. A. Borisevich

Belarusian State Technological University

THE WIND FORCE ACTING ON A TREE CROWN

A literature review of the existing experimental work shows that the drag load acting on the tree crown increases linearly with the velocity. With increasing wind speed both frontal area of the tree crown and drag coefficient are reduced. But if we calculate the product $AC_d v / 2$ based on the experimental data we can find that this product is approximately constant. This is true for the whole tree crown and for element of the tree crown. The method for evaluation wind load and drag coefficients for the trees of different species, size and morphology that does not require special equipment is presented. Field experiments and numerical simulation are performed for five samplings of a pine tree at their free falling. The field experiments were carried out in the forest for symmetrical, 23–27 m tall pine trees. The numerical experiments that reproduce dynamic global behavior of the real tree under this assumption show that the results are similar to those previously obtained in wind tunnel. The results obtained have shown that for the drag force the linear dependence on the velocity can be used and the drag coefficient for the pine trees of different sizes lies in the range 48 to 75.4 kg/(m·s).

Key words: tree crown, drag force, frontal area, drag coefficient.

Введение. Существует большое количество технических и биологических задач, связанных с исследованием механического взаимодействия кроны дерева с воздушной средой, которые создают необходимость в данных и моделях для исследования такого взаимодействия. Результаты исследований могут использоваться для описания движения деревьев как объекта труда лесозаготовительного производства, понимания механизма их устойчивости к повреждению сильным ветром и влияния ветра на естественные функции деревьев. Обзор большого разнообразия механического взаимодействия

ветра и растений от отдельных растений до систем можно найти в источнике [1].

Основная часть. В последние годы появилось большое количество работ, в которых предпринимаются попытки создания модели, которая могла бы предсказывать последствия сильного ветра на лесные насаждения [2–6]. Однако создать такую модель невозможно, не зная силу, с которой ветер взаимодействует с отдельным деревом. Несмотря на то, что ветровая нагрузка была измерена для небольших деревьев или их частей в аэродинамической трубе [7–10], деревья реальных размеров до сих пор

не исследованы ввиду очевидных экспериментальных трудностей.

Сила сопротивления, действующая на крону дерева при обтекании его воздухом, состоит из двух составляющих: сил касательного (тангенциального) трения, направленных вдоль поверхности тела, и сил давления, направленных по нормали к поверхности. Общепринятая формула для определения ветровой нагрузки на крону дерева

$$F = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2, \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха; A – площадь проекции ствола и кроны дерева на плоскость, перпендикулярную вектору скорости ветра v ; C_d – безразмерный коэффициент сопротивления, который зависит от формы кроны и числа Рейнольдса.

Формула (1) получена на основе законов движения Ньютона для твердых тел, обтекаемых потоком, и широко используется в научной и инженерной литературе. Она предполагает, что сила сопротивления пропорциональна квадрату скорости потока. Однако в некоторых работах отмечено (см. [11] и цитируемую там литературу), что данную зависимость нельзя применить для деревьев и формулу (1) предложено записывать в виде

$$F = \frac{1}{2} \rho A C_d v^{2+b}, \quad (2)$$

где b – показатель Фогеля.

Значение показателя Фогеля, равное $b = -1$, встречается в некоторых исследованиях [12], так что зачастую сила сопротивления пропорциональна скорости.

Очевидно, что пористая структура кроны дерева увеличивает силу сопротивления за счет увеличения числа Рейнольдса при обтекании ее воздухом, но основным фактором, влияющим на изменение силы сопротивления, является значительная деформация кроны дерева под действием потока воздуха, которую принято называть реконfigurацией. Это естественный механизм, при помощи которого деревья уменьшают нагрузку от воздушного потока. Реконfigurация, вызванная потоком воздуха, уменьшает ветровую нагрузку путем двух механизмов. Во-первых, за счет уменьшения площади проекции кроны дерева A на плоскость, перпендикулярную вектору скорости потока. Во-вторых, крона становится более обтекаемой, что также приводит к уменьшению ветровой нагрузки. Эти два пути уменьшения силы сопротивления подробно рассмотрены при изучении кроны дерева в аэродинамической трубе в работах [8, 10].

Ряд авторов использовали уравнение (1) для вычисления силы сопротивления, действующей на дерево. При этом пути они обращались с C_d и A различным образом. Некоторые использовали площадь A , найденную без приложения ветровой нагрузки, и применяли переменный коэффициент C_d , который являлся функцией скорости [9]. Другие использовали постоянный коэффициент сопротивления C_d и находили изменение площади кроны дерева A при увеличении скорости ветра [13–16]. Однако работ, в которых были бы найдены эти величины, совсем немного. В свою очередь, анализируя работы, в которых величины коэффициента сопротивления C_d и площади поперечного сечения A все таки найдены, мы увидим, что при увеличении скорости ветра коэффициент сопротивления C_d и площадь поперечного сечения A уменьшаются. Однако, если мы найдем произведение $vAC_d/2$, то увидим, что отклонение этого произведения от постоянной величины не превышает заявленной погрешности проведенных экспериментов.

Например, в работе [8] исследовалась сила сопротивления для крон 3–5-метровых деревьев нескольких пород в аэродинамической трубе. В результате исследований получены сила, действующая на крону, и данные для изменения площади поперечного сечения кроны с увеличением скорости потока воздуха. Затем на основании формулы (1) найдены безразмерные коэффициенты сопротивления C_d , величина которых также является функцией скорости. Однако, если по полученным в работе результатам найти произведение $vAC_d/2$, то у нас появится зависимость, представленная на рис. 1.

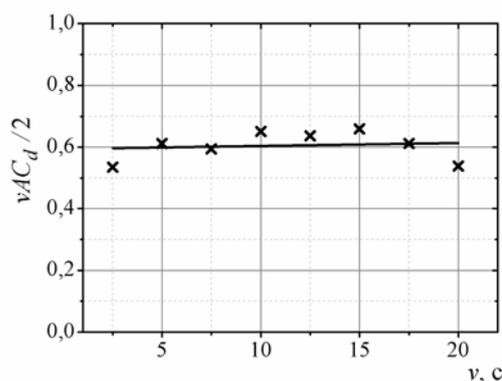


Рис. 1. Зависимость произведения $vAC_d/2$ кроны черного тополя от скорости, вычисленная согласно данным работы [8]. Крестиками обозначены результаты эксперимента; линия – результаты линейной аппроксимации

Анализируя график, можно увидеть, что результаты эксперимента отклоняются от прямой не более чем на величину погрешностей, заяв-

ленных в эксперименте. Аналогичный результат получим для более ранних экспериментов, представленных в работах [9, 10].

В работе [7] исследовались коэффициенты сопротивления элемента кроны кедровой сосны в предположении, что сила сопротивления пропорциональна квадрату скорости обтекания средой.

В качестве методики определения коэффициента сопротивления использовался гидродинамический подход, при котором, используя теорию гидродинамического подобия и ориентируясь на критерий Рейнольдса, предложено изучать коэффициент сопротивления ветки кедровой сосны при ее движении в воде. Для коэффициента при квадрате скорости была получена сложная зависимость в виде полинома пятого порядка по скорости со знакопеременными слагаемыми. Однако, если вычислить по полученным данным силу сопротивления, действующую на элемент кроны, получим линейную зависимость с критерием согласия Пирсона $\chi^2 = 0,991$ (рис. 2).

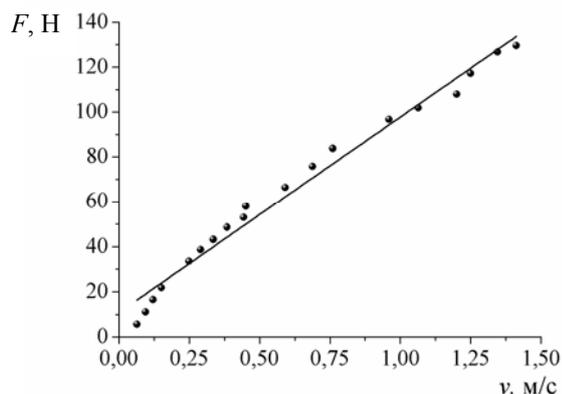


Рис. 2. Зависимость силы сопротивления элемента кроны кедровой сосны от скорости, вычисленная согласно данным работы [7]

Таким образом, на основании имеющихся экспериментальных данных, можно утверждать, что сила сопротивления, действующая на крону дерева, увеличивается линейно с увеличением скорости, т. е. имеет форму

$$F = \beta v, \quad (3)$$

где β – коэффициент сопротивления, который имеет размерность (кг/с).

Коэффициент сопротивления β не разделяет безразмерный коэффициент сопротивления C_d и площадь поперечного сечения A , а учитывает их совместное действие.

Экспериментальное измерение силы сопротивления крон деревьев и определение коэффициента сопротивления связаны с рядом технических трудностей, обусловленных больши-

ми геометрическими размерами деревьев. Поэтому на данный момент эксперименты проведены для отдельных частей деревьев или деревьев небольших размеров, подходящих под размер аэродинамической трубы. В работе [17] предложен метод для определения коэффициентов сопротивления деревьев различных пород и размеров, основанный на сопоставлении результатов эксперимента и численного моделирования падения дерева. В данной работе проведено сопоставление результатов с результатами, полученными другими авторами.

Натурный эксперимент. Эксперимент проводился в Минском государственном производственном лесохозяйственном объединении ГЛХУ «Стародорожский лесхоз». После среза и сталкивания вальщиком дерево свободно падает. Затем измеряется длина и диаметр ствола у основания дерева. По найденным данным при известной плотности древесины вычислена масса ствола дерева. Падение каждого дерева было снято на видеокамеру. По результатам видеосъемки получены фотографии падающих деревьев через каждую секунду после начала падения. На рис. 3 представлены осевые линии ствола дерева через каждую секунду от момента падения дерева для одного из экспериментов.

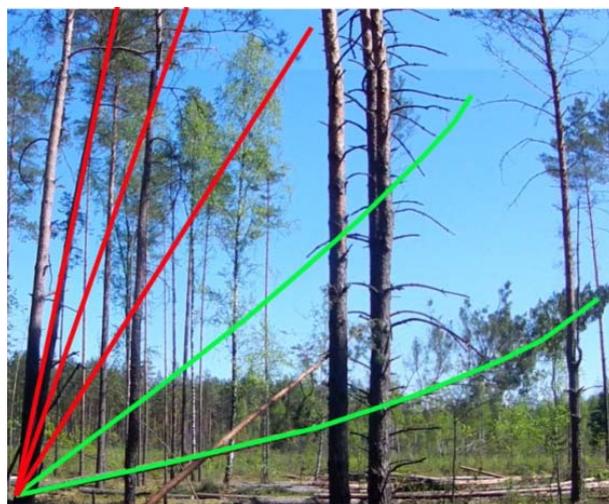


Рис. 3. Фотографии падающего дерева через каждую секунду после начала движения

Численный эксперимент. Численный эксперимент основан на моделировании движения упругого стержня под действием силы тяжести и сил сопротивления и подробно изложен в работе [18]. Сила сопротивления приложена на конце стержня в соответствии с расположением кроны. Предполагалось, что сила сопротивления распределена по закону треугольника и имеет максимум у основания кроны и ноль на вершине (рис. 4).

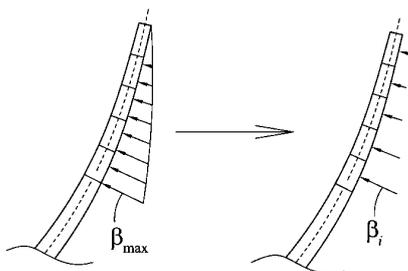


Рис. 4. Силы сопротивления, действующие на крону дерева

В результате численного моделирования движения стержня можно получить формы осевой линии ствола дерева в процессе его движения и время падения. Далее коэффициент сопротивления β_{\max} необходимо подобрать таким образом, чтобы осевые линии в численном и натурном экспериментах совпадали в любой момент времени.

Образец	Высота дерева, м	Площадь сечения кроны, м ²	Диаметр ствола у основания, см	Время падения, с	Коэффициент сопротивления, кг/(м·с)
1	23	26,47	30	9,5	69,6
2	25	18,00	40	5,0	48,0
3	25	22,00	40	6,9	72,0
4	26	34,45	45	7,5	75,4
5	27	24,38	47	7,0	65,2

Таким образом, сопоставляя экспериментальные данные о времени падения и форме упругой линии ствола дерева с результатами моделирования данного процесса, можно определить границы изменения этого коэффициен-

та. Итоги эксперимента и его моделирования для сосны приведены в таблице.

Из таблицы следует, что коэффициент сопротивления находится в диапазоне 48,0–75,4 кг/(м·с). Если рассчитать безразмерный коэффициент C_d с помощью формулы (1), то получим результат, представленный на рис. 5.

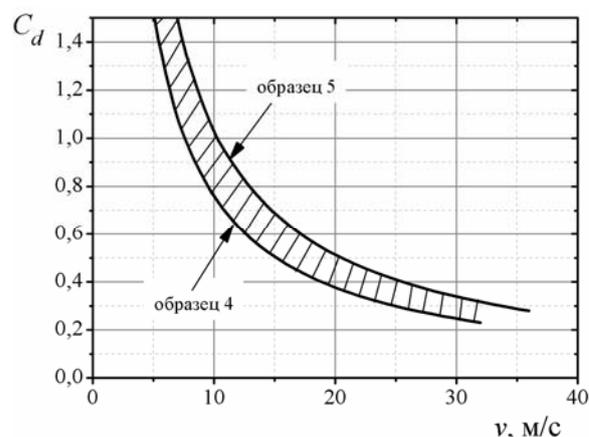


Рис. 5. Безразмерный коэффициент сопротивления C_d

Результаты расчетов очень точно согласуются с экспериментальными результатами, полученными в работах [8–10].

Закключение. Из проведенных исследований следует, что реконфигурация кроны дерева под действием потока воздуха происходит таким образом, что произведение $vAC_d/2$ остается неизменным при увеличении скорости потока. Следовательно, нет необходимости использовать квадратичную зависимость для скорости и переменные коэффициенты в выражении для силы сопротивления, а нужно применять линейную зависимость с постоянным коэффициентом сопротивления.

Литература

- Langre E. Effects of wind on plants // Annu. Rev. Fluid Mech. 2008. Vol. 40. P. 141–168.
- Dupont S., Pivatoa D., Bruneta Y. Wind damage propagation in forests // Agricultural and Forest Meteorology. 2015. Vol. 214–215. P. 243–251.
- Hale S. A., Gardiner B., Peace A., Nicoll B., Taylor P., Pizzirani S. Comparison and validation of three versions of a forest wind risk model // Environmental Modelling & Software. 2015. Vol. 68. P. 27–41.
- Locatelli T., Gardiner B., Tarantola S., Nicoll B., Bonnefond J.-M., Garrigou D., Kamimura K., Patenaude G. Modelling wind risk to Eucalyptus globulus (Labill.) stands // Forest Ecology and Management. 2016. Vol. 365. P. 159–173.
- Dupont S. A simple wind–tree interaction model predicting the probability of wind damage at stand level // Agricultural and Forest Meteorology. 2016. Vol. 224. P. 49–63.
- Locatelli T., Tarantola S., Gardiner B., Patenaude G. Variance-based sensitivity analysis of a wind risk model – Model behaviour and lessons for forestmodelling // Environmental Modelling & Software. 2017. Vol. 87. P. 84–109.
- Орлов С. А., Шрагер Л. А. Исследование коэффициента сопротивления элементов кроны кедровой сосны // Вестник Томского государственного университета. 2011. № 2(14): Математика и механика. С. 103–110.

8. Vollsinger S., Mitchell S. J., Byrne K. E., Novak M. D., Rudnicki M. 2005. Wind tunnel measurements of crown streamlining and drag relationships for several hardwood species // *Can. Journal Forest Res.* 2005. Vol. 35. P. 1238–1249.
9. Mayhead G. J. Some drag coefficients for British forest trees derived from wind tunnel studies // *Agricultural Meteorology.* 1973. Vol. 12. P. 123–130.
10. Rudnicki M., Mitchell S. J., Novak M. D. Wind tunnel measurements of crown streamlining and drag relationships for three conifer species // *Can. Journal Forest Res.* 2004. Vol. 34. P. 666–676.
11. Cullen S. Trees and wind: a practical consideration of the drag equation velocity exponent for urban tree risk management // *Journal of Arboriculture.* 2005. Vol. 31(3). P. 101–113.
12. Smiley E. T., Key A., Greco C. E. Root barriers and windthrow potential // *Journal of Arboriculture.* 2000. Vol. 26(4). P. 213–217.
13. Smith V. G., Watts M., James D. F. Mechanical stability of black spruce in the clay belt region of northern Ontario // *Can. Journal Forest Res.* 1987. Vol. 17. P. 1081–1091.
14. Peltola H., Kellomäki S. A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage of Scots pines at stand edge // *Silva Fenn.* 1993. Vol. 27. P. 99–111.
15. Hedden R. L., Fredricksen T. S., Williams S. A. Modelling the effect of crown shedding and streamlining on the survival of loblolly pine exposed to acute wind // *Can. Journal Forest Res.* 1995. Vol. 25. P. 704–712.
16. Spatz H., Bruechert F. Basic biomechanics of self-supporting plants: wind loads and gravitational loads on a Norway spruce tree // *Forest Ecology and Management.* 2000. Vol. 135. P. 33–44.
17. Борисевич С. А., Камлюк А. Н., Ребко Д. В. Определение сопротивления движению кроны дерева // *Труды БГТУ.* 2013. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информ. С. 34–36.
18. Борисевич С. А., Камлюк А. Н. Модель гибкого стержня в трехмерном пространстве и ее применение для описания динамики падения ствола дерева // *Известия Нац. академии наук Беларуси.* Сер. физ.-мат. наук. 2012. № 2. С. 69–74.

References

1. Langre E. Effects of wind on plants. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2008, vol. 40, pp. 141–168.
2. Dupont S., Pivatoa D., Bruneta Y. Wind damage propagation in forests. *Agricultural and Forest Meteorology.* 2015, vol. 214–215, pp. 243–251.
3. Hale S. A., Gardiner B., Peace A., Nicoll B., Taylor P., Pizzirani S. Comparison and validation of three versions of a forest wind risk model. *Environmental Modelling & Software.* 2015, vol. 68, pp. 27–41.
4. Locatelli T., Gardiner B., Tarantola S., Nicoll B., Bonnefond J.-M., Garrigou D., Kamimura K., Patenaude G. Modelling wind risk to *Eucalyptus globulus* (Labill.) stands. *Forest Ecology and Management.* 2016, vol. 365, pp. 159–173.
5. Dupont S. A simple wind–tree interaction model predicting the probability of wind damage at stand level. *Agricultural and Forest Meteorology.* 2016, vol. 224, pp. 49–63.
6. Locatelli T., Tarantola S., Gardiner B., Patenaude G. Variance-based sensitivity analysis of a wind risk model – Model behaviour and lessons for forestmodelling. *Environmental Modelling & Software.* 2017, vol. 87, pp. 84–109.
7. Orlov S. Ya., Shrager L. A. Research of the resistance coefficient of cedar pine crown elements. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Tomsk State university], 2011, vol. 2(14), Journal of Mathematics and Mechanics, pp. 103–110 (In Russian).
8. 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. *Can. Journal Forest Res.* 2005, vol. 35, pp. 1238–1249.
9. Mayhead G. J. Some drag coefficients for British forest trees derived from wind tunnel studies. *Agricultural Meteorology.* 1973, vol. 12, pp. 123–130.
10. Rudnicki M., Mitchell S. J., Novak M. D. Wind tunnel measurements of crown streamlining and drag relationships for three conifer species. *Can. Journal Forest Res.* 2004, vol. 34, pp. 666–676.
11. Cullen S. Trees and wind: a practical consideration of the drag equation velocity exponent for urban tree risk management. *Journal of Arboriculture.* 2005, vol. 31(3), pp. 101–113.
12. Smiley E. T., Key A., Greco C. E. Root barriers and windthrow potential. *Journal of Arboriculture.* 2000, vol. 26(4), pp. 213–217.
13. Smith V. G., Watts M., James D. F. Mechanical stability of black spruce in the clay belt region of northern Ontario. *Can. Journal Forest Res.* 1987, vol. 17, pp. 1081–1091.
14. Peltola H., Kellomäki S. A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage of Scots pines at stand edge. *Silva Fenn.* 1993, vol. 27, pp. 99–111.

15. Hedden R. L., Fredricksen T. S., Williams S. A. Modelling the effect of crown shedding and streamlining on the survival of loblolly pine exposed to acute wind. *Can. Journal Forest Res.* 1995, vol. 25, pp. 704–712.

16. Spatz H., Bruechert F. Basic biomechanics of self-supporting plants: wind loads and gravitational loads on a Norway spruce tree. *Forest Ecology and Management.* 2000, vol. 135, pp. 33–44.

17. Borisevich S. A., Kamluk A. N., Rebko D. V. Determination of the resistance to the moving tree crown. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 6: Physics and Mathematics. Informatics, pp. 34–36 (In Russian).

18. Borisevich S. A., Kamluk A. N. The flexible rod model in three-dimensional space and its application to investigations of the tree stem dynamics. *Izvestiya natsionalnoy akademii nauk Belarusi* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus], series Physics and Mathematics Sciences, 2012, pp. 69–74 (In Russian).

Информация об авторе

Борисевич Сергей Анатольевич – ассистент кафедры информатики и веб-дизайна. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: borsera@belstu.by

Information about the author

Borisevich Sergey Anatol'yevich – assistant lecturer, the Department of Informatics and Computer Graphics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: borsera@belstu.by

Поступила 20.04.2017