

## МКЭ-анализ крутильно-изгибного нагружения бионической несущей структуры, характерной для балтийского региона

С.С. Довнар, А.Д. Пенкина

Белорусский национальный технический университет

e-mail: ssdov@tut.by

*FEA simulation of the Baltic tree's bionic load-bearing structure is provided. An array of trees is virtually constructed with heuristic variations in the branch sections and crown shapes. Eccentric wind loads are applied so bending and twisting deformations were simulated. Ironed stress bands (ISB), going along the branch in its middle part, are stated as a steady feature of the tree stress field. The junction between stem and branch becomes free from stress concentration for a wide range of geometry variations. Investigated bionic tree-like forms should be recommended for implementation in the common machinery.*

Природные бионические формы [1] являются источником геометрических решений для техники, в частности, для машиностроения [2]. Средством выявления оптимальных бионических конструктивов в последнее время все чаще служит метод конечных элементов (МКЭ). Его применяют, например, для анализа древесных несущих систем (ДНС) [3]. Представляется, что деревья балтийского региона весьма перспективны для бионики как источники гармонических форм. Их ДНС мультивалентны и приспособлены к несению как ветровой нагрузки, так и гравитационных воздействий.

Проведенный недавно МКЭ-анализ высоко нагруженного каштана конского обыкновенного показал [4], что в нем самоорганизуется эффективное сопряжение несущей ветви и ствола. Оно свободно от концентрации напряжений, что необычно для машиностроения. В технике напряжения, наоборот, сгущаются в районе стыков балок и стержней.

Данная работа является продолжением исследования [4] ДНС в условиях варьирования размеров сопряжений и комбинирования изгибных и крутильных нагрузок.

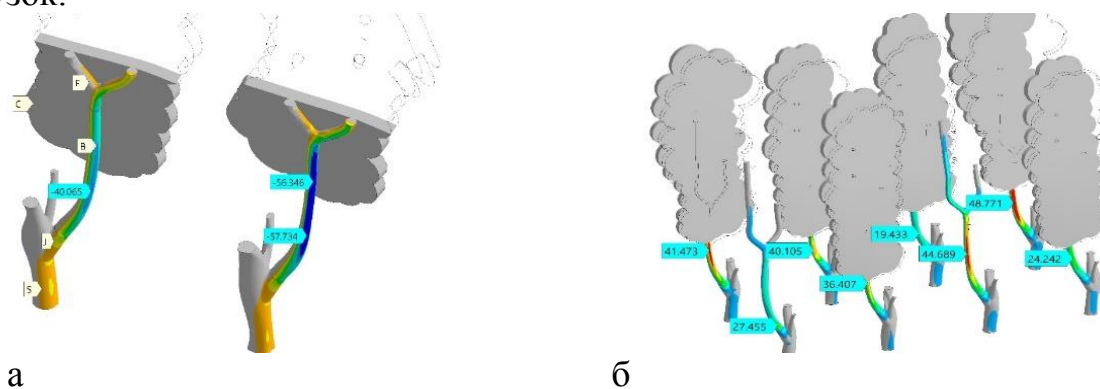


Рис.1. Картины минимального главного (а) и эквивалентного (б) напряжений (МПа) для массива ДНС под напором 380 Па (а – подветренная сторона, косой напор; б - наветренная сторона, нормальный напор) и силой тяжести: S – ствол; В – ветвь; J – сопряжение S-B; F – развилка ветвей, удерживающая крону С;  $\times 1$

Особенностью данной ДНС является «разглаженный» очаг напряжений (РОН), лежащий в средней части ветви В (примерно между маркерами -57.7 и -56.3 на рис. 1, а) и не затрагивающий сопряжение J между ветвью В и стволом S. РОН не создает концентрации напряжений и не подвергает особой опасности самый чувствительный участок ДНС – сопряжение ветви и ствола.

РОН как желаемая черта напряженного состояния бионической конструкции устойчиво повторяется в массиве деревьев (рис. 1, б). Массив построен путем эвристического варьирования размеров и форм ключевых сечений ветви и ствола в поле допуска « $\pm 1/3$ » от базового варианта. Также псевдослучайно перестраивались размеры и формы крон С, что влияло на результирующие силы нагружения.

Варьирование вызвало разброс максимальных эквивалентных напряжений (рис. 1, б) в массиве деревьев до 2,51 раза. Однако, во всех ДНС сохранились свои РОН. Сопряжения не перегружены. Тип напряженного состояния можно считать устойчивым и структурно благоприятным.

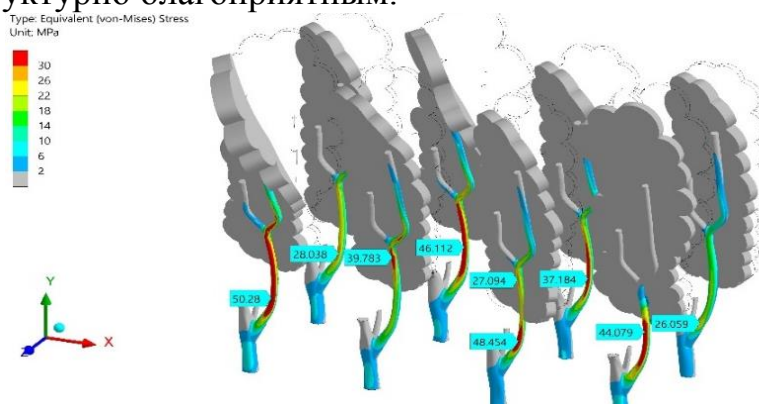


Рис.2. Картина эквивалентного напряжения (МПа) при эксцентричном нагружении массива деревьев штормовым напором 600 Па;  $\times 2$

На рис.2 массив деревьев нагружен ветровым напором несимметрично, по правым краям крон. Поэтому к изгибающим напряжениям в ДНС добавляются крутильные. Каждая ветвь подвергается крутильно-изгибному нагружению. Последнее, однако, доминирует.

Центры РОН отмечены маркерами. Видно, что сила и форма РОН подвергается вариациям. Разброс напряжений между деревьями достигает 1,92 раз. Центр РОН перемещается вдоль несущей ветви. Так, для большинства деревьев центр РОН находится на верхней границе нижней трети ветви (например, 50,28 МПа). Для одного дерева (39,783 МПа) центр РОН смещен вверх по ветви, вплоть до развилки. Однако, РОН, как черта напряженного состояния, стабильно воспроизводится от дерева к дереву. Таким образом, геометрия сопряжения «ствол – ветвь» эффективно противодействует концентрации здесь как сжимающих, так и растягивающих напряжений.

«Предлагаемая» балтийским каштаном бионическая форма сопряжения «ствол – ветвь» является устойчивой к случайным вариациям параметров. Всплесков чувствительности модели не выявлено. Рассматриваемый бионический стиль сопряжений может быть рекомендован для использования в технике.

Реализация таких усиленных сопряжений между условными «стволом» и «ветвью» в несущей системе машины возможна с помощью 5-координатных станков и 3D-принтеров.

*Список использованных источников:*

1. C. Mattheck, Design in Nature, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1998.
2. A. Samek, Bionika. Wiedza Przyrodnicza dla Inżynierów, Wydawnictwa AGH, Kraków, 2010.
3. T. Jacksona, A. Shenkina, A. Wellpottb et al., “Finite element analysis of trees in the wind based on terrestrial laser scanning data,” Agricultural and Forest Meteorology, vol. 265, pp. 137–144, 2019.
4. Stanislau Dounar, Alexandre Iakimovitch, Katsiaryna Mishchanka, Andrzej Jakubowski, and Leszek Chybowski. FEA Simulation of the Biomechanical Structure Overload in the University Campus Planting. Applied Bionics and Biomechanics, Volume 2020, Article ID 8845385. <https://doi.org/10.1155/2020/8845385>