

DOI: 10.15593/2224-9826/2015.3.07

УДК 624.042

А.Д. Нугуманова, Г.Г. КашевароваПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**РАСЧЕТ ВАНТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ
НА ПРИМЕРЕ ОТТЯЖЕК МАЧТЫ**

Оттяжки играют важную роль в устойчивости мачт. Их расчет зависит от множества нюансов, связанных с геометрической и физической нелинейностью конструкций. Рассмотрены существующие методики расчета, имеющие множество упрощений и недостатков, которые ведут к погрешности результатов. Расчеты выполнены в двух программных комплексах – SCAD и ANSYS. Обоснована необходимость в совершенствовании методов расчета вантовых конструкций.

Ключевые слова: вантовые конструкции, висячие конструкции, оттяжки мачты, нелинейная задача, метод конечных элементов.

A.D. Nugumanova, G.G. Kashevarova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**COMPUTATION OF CABLE-STAYED CONSTRUCTIONS
ON THE EXAMPLE OF ANCHOR STAYS**

Anchor stays play an important role in stiffness of masts. Their computation depends on a set of nuances, because of geometrical and physical nonlinearity of constructions. The existing calculation procedures have many simplifications and imperfections, which carry to an error of results are considered. There are computations in the two software systems: SCAD and ANSYS. Need for enhancement of methods of calculation of cable-stayed constructions is revealed.

Keywords: cable-stayed constructions, suspended constructions, anchor stays, non-linear task, finite-element method.

Вантовые конструкции – это разновидность висячих конструкций. Чаще всего они используются в конструкциях висячих покрытий, мостов и радиомачт. С помощью вантовых конструкций можно создавать уникальные сооружения с различными вариациями геометрических форм, эффективно перекрывать большие пролеты, при этом обеспечивая легкость сооружений. Несмотря на большой опыт их проектирования, при расчетах принимаются большие допущения, которые

могут служить причиной обрушения мачт. Например, в 2012 г. упала верхняя секция 208-метровой мачты на оттяжках в городе Фельсберг-Берус, Германия; в 2007 г. обрушилась 300-футовая верхняя секция телевизионной башни в штате Пенсильвания, США. В России одним из известных случаев обрушения мачт на оттяжках считается падение восьми стальных радиомачт высотой 186 м в 1952 г.

Вантовые конструкции обладают геометрической и физической нелинейностью. Геометрическая нелинейность обусловлена возникновением больших перемещений и деформаций элементов (отказ от рассмотрения уравнений равновесия по недеформированному состоянию). Показателем геометрической нелинейности служит ситуация, при которой перемещения стержневой системы не могут считаться пренебрежимо малыми по сравнению с размерами сооружения. Физическая же нелинейность обусловлена непропорциональностью между напряжениями и деформациями (отклонение от закона Гука).

При расчете мачт необходимо выполнять расчет на свободные колебания, с помощью которого мы можем учесть пульсационную составляющую ветровой нагрузки, сейсмические воздействия и т.д. Определение форм свободных колебаний системы и частот имеет смысл в линейной задаче. В нелинейных же речь идет о разложении движения системы по формам свободных колебаний в окрестностях равновесного положения при линеаризации поведения системы.

Математическая формулировка задачи для представленных выше двух нелинейностей будет одинакова. Все виды динамического анализа основываются на общем уравнении движения в конечно-элементной форме:

$$[M]\{u''\} + [C]\{u'\} + [K]\{u\} = \{F(t)\},$$

где $[M]$ – матрица масс; $[C]$ – матрица сопротивлений; $[K]$ – матрица жесткостей; $\{u''\}$ – вектор узловых ускорений; $\{u'\}$ – вектор узловых скоростей; $\{u\}$ – вектор узловых перемещений; $\{F\}$ – вектор нагрузок; (t) – время.

С помощью этого уравнения определяются значения неизвестных $\{u\}$, которые в любой момент времени удовлетворяют условиям равновесия системы при наличии сил инерции и рассеяния энергии. Решение уравнения выполняется либо прямым методом Ньюмарка, либо на основе метода суперпозиции форм колебаний.

Вся информация о нелинейностях содержится в матрице жесткости конструкции. В физически нелинейных задачах механические характеристики материалов представляют собой сложные функции компонентов деформаций, напряжений или перемещений, связанные с физической моделью материала. Нелинейность задачи ведет к нарушению принципа суперпозиции и ее решение во многом зависит от последовательности нагружения.

Существует несколько методик расчета мачт на оттяжках.

Метод форм (спектральный анализ). Главный его недостаток состоит в том, что он не применим в нелинейной постановке. В первом приближении можно использовать коэффициент динамичности, но это приведет лишь к утяжелению конструкции и не сможет послужить гарантией ее прочности. Придется проводить динамический расчет. Также надо учесть, что расчет на импульсные воздействия с помощью коэффициентов динамичности представляется некорректным.

Для решения динамической задачи можно выполнить ее линеаризацию [1]. Существует три способа линеаризации:

- замена включающихся на заданное направление ветра оттяжек рамными стержнями с такой же жесткостью $E\Gamma$, малой изгибной жесткостью EI (при необходимости) и удаление из расчетной схемы остальных оттяжек;

- замена оттяжек ферменными стержнями (работающими только на сжатие, растяжение) с вычислением их приведенных жесткостей;

- замена оттяжек связью конечной жесткости – пружиной с вычислением их приведенных жесткостей.

Данные упрощения и использование мгновенных матриц жесткости в спектральном анализе могут привести к значительным ошибкам в вычисленных частотах и формах колебаний [2].

При определении предварительного напряжения оттяжек в работе используются два способа [3]:

- задаем последовательность монтажа и значений регулирующих воздействий и, решив несколько задач для мачты с изменяющейся расчетной схемой, вычисляем необходимые параметры предварительного напряжения. Недостаток способа заключается в большом количестве вычислений и установленной технологии монтажа, что не всегда совпадает с реальными условиями;

– не учитываем монтаж, выделяем главные усилия преднапряжения и от них точно вычисляем остальные параметры (наиболее часто используемый способ). Принимаем гипотезу, что ствол мачты не напряженный до монтажа, в котором возникает напряженно-деформированное состояние посредством усилий преднапряжения оттяжек.

Методы проверки устойчивости мачты

Мачта рассчитывается на устойчивость в целом и ее отдельных элементов при основных сочетаниях нагрузок (по СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия»): 1) собственный вес и максимальное монтажное натяжение оттяжек (при отсутствии ветра и температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$); 2) собственный вес и ветровая нагрузка.

– решение задачи в линейной постановке, нахождение коэффициента запаса устойчивости;

– нелинейный расчет, при котором прикладываемые нагрузки увеличиваются на коэффициент запаса устойчивости (более точный метод).

Для решения нелинейной задачи можно использовать три метода [4]:

1. Простой шаговый – на каждом шаге решается линеаризованная задача, в которой жесткость вантового элемента определяется при значении натяжения, полученного на предыдущем шаге.

2. Шаговый с итерационным уточнением – здесь учитывается, что результат решения на каждом шаге может быть неточным и выполняется его итерационное уточнение, но жесткости все равно принимаются по предыдущему шагу.

3. Шагово-итерационный – отличается от предыдущего тем, что жесткости вантовых элементов пересчитываются на каждой итерации.

Общих рекомендаций по выбору метода не существует, и в сложных случаях не стоит ограничиваться только одним методом.

Пример расчета мачты на оттяжках

Метод перемещений был применен при расчете мачты на оттяжках ($H = 22\text{ м}$) в программах SCAD [5, 7] и ANSYS, сертифицированных Госстандартом (Россия). Результаты расчетов в программе ANSYS приведены на рис. 1, 2.

Ствол мачты состоит из стальных секций треугольного сечения длиной 2 м со стороной 0,4 м. Пояса секций – труба $d = 42 \times 3,5$ (ГОСТ 8732–78); распоры – уголок 32×4 (ГОСТ 8509–93); решетка – круг $d = 12$ (ГОСТ 2590–2006) [8]. Материал металлоконструкций –

сталь С255 (ГОСТ 27772–88) [9]. Стык поясов секций – болтовой через фланцы, болты $d = 12$ мм, класс прочности 5.8. Мачта установлена на опорный столик на кирпичной стене здания, а также крепится к четырем анкерным узлам, размещаемым на расстоянии 7,8 м через 90° . Число ярусов оттяжек – 2, крепление к стволу на высоте 10.100 м, 20.100 м. Оттяжки изготовлены из стального каната диаметром 9,6 мм по ГОСТ 2688–80. Место строительства – г. Пермь.

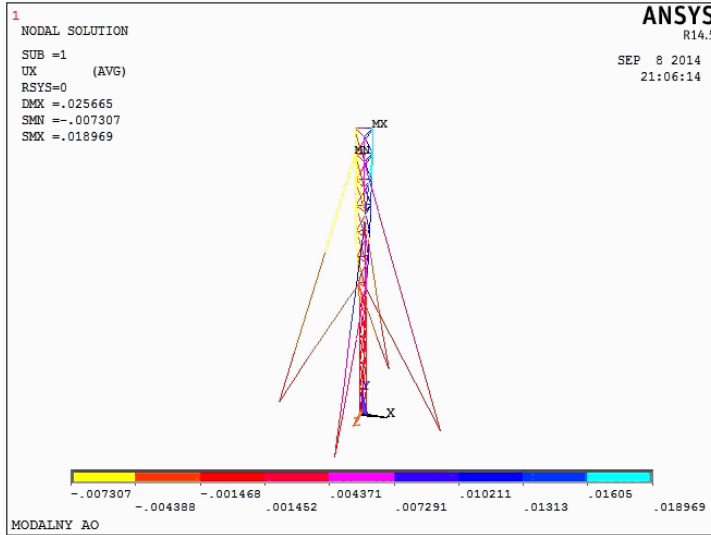


Рис. 1. Отклонение от вертикальности

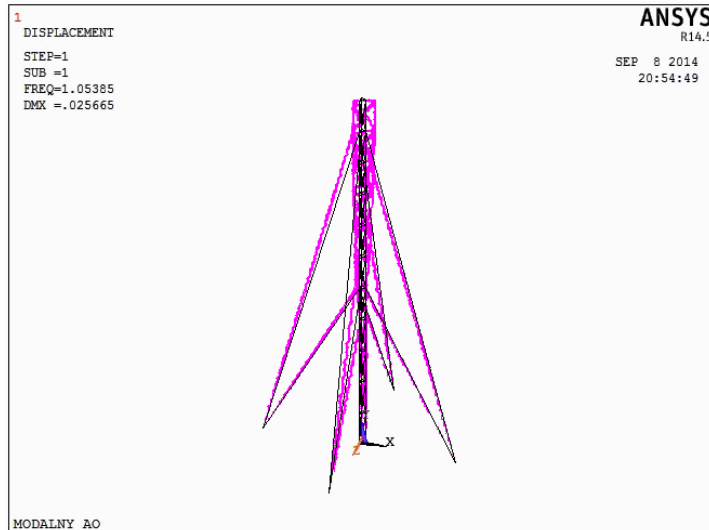


Рис. 2. Первая форма колебаний башни

Расчет на устойчивость мачты показал запас в 2,51 раза (SCAD) и в 2,72 раза (ANSYS).

Расчет несущей способности поясов, распорок, раскосов и оттяжек по комбинациям загрузок показал, что она достаточна для восприятия проектируемых нагрузок. Разница результатов данных расчетов составила 7–12 %. Максимальный коэффициент использования был выявлен при работе раскоса мачты – 0,855 (SCAD), 0,79 (ANSYS).

Из-за различий в библиотеке конечных элементов, решателей, заданий нелинейности программные комплексы показали разные результаты: максимальное отклонение верха мачты под действием ветра: $L_{\max} = 56$ мм (SCAD), $L_{\max} = 52$ мм (ANSYS). Оба значения меньше нормативного $L_{\text{доп}} = 22000/100 = 220$ мм. Разница в результатах составила 7 %.

Выводы

Методы расчета динамических задач, принятые в нормативных документах, не позволяют выполнять нелинейные расчеты. Нахождение частот собственных колебаний вызывает большие трудности.

Пути упрощения: схематизация материала, линеаризация расчетной схемы, применение узлов с упругими свойствами, схематизация нагрузок, использование мгновенных матриц жесткостей в спектральном анализе – могут приводить к определенной доле погрешности, процент которой выявить невозможно. Необходимо совершенствовать имеющиеся способы расчета вантовых конструкций.

Рекомендуется применять несколько методов расчета мачт на оттяжках, использовать несколько программных комплексов. Окончательный результат принимать по наихудшему варианту.

Библиографический список

1. Перельмутер А.В. SCADOffice. Расчет мачт на оттяжках. – Киев: Изд-во СКАД СОФТ, 2004. – 46 с.
2. Евзеров И.Д., Лазнюк М.В., Ниолова Т.А. Расчет и проектирование мачт на оттяжках в среде ПК Лира // Металлические конструкции. – 2009. – № 1, т. 15. – С. 23–29.
3. Методика расчета мачт на оттяжках (статика, динамика, устойчивость). – К.: УкрНИИпроект-стальконструкция, 1991.
4. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики. – Запорожье: Изд-во журнала «Світ геотехніки», 2009. – 400 с.

5. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – 4-е изд., перераб. – М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2011. – 736 с.

6. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD / В.С. Карпиловский [и др.]. – М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2011. – 656 с.

7. Константинов И.А., Лалин В.В., Лалина И.И. Строительная механика. Расчет стержневых систем с использованием программы SCAD: учеб.-метод. комплекс. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 228 с.

8. Формирование сечений и расчет их геометрических характеристик / В.С. Каринловский [и др.]. – Киев: Компас, 2000. – 80 с.

9. Справочник проектировщика. Металлические конструкции: в 3 т. – Т. 3. – М.: Изд-во АСВ, 1999.

References

1. Perel'muter A.V. SCAD Office. Raschet macht na ottiazhkakh [Calculation of guyed masts]. Kiev: SCAD SOFT, 2004. 46 p.

2. Evzerov I.D., Lazniuk M.V., Niolova T.A. Raschet i proektirovanie macht na ottiazhkakh v srede PK Lira [Calculation and design of guyed masts in the environment LIRA]. *Metallicheskie konstruksii*, 2009, no. 1, vol. 15, pp. 23-29.

3. Metodika rascheta macht na ottiazhkakh (statika, dinamika, ustoichivost') [The method of calculation of guyed masts (statics, dynamics, stability)]. Kiev: UkrNIIproekt-stal'konstruksiia, 1991.

4. Klovanih S.F. Metod konechnykh elementov v nelineinykh zadachakh inzhenernoi mekhaniki [Finite element method in nonlinear problems of engineering mechanics]. Zaporozh'e: Izdatel'stvo zhurnala "Svit geotekhniki", 2009. 400 p.

5. Perel'muter A.V., Slivker V.I. Raschetnye modeli sooruzhenii i vozmozhnost' ikh analiza [Calculation models of structures and the possibility of their analysis]. Moscow: SKAD SOFT, 2011. 736 p.

6. Karpilovskii V.S. [et al.] SCAD Office. Vychislitel'nyi kompleks SCAD [Computing complex SCAD]. Moscow: SKAD SOFT, 2011. 656 p.

7. Konstantinov I.A., Lalin V.V., Lalina I.I. Stroitel'naia mekhanika. Raschet sterzhnevyykh sistem s ispol'zovaniem programmy SCAD [Building mechanics. Calculation of core systems using SCAD]. Saint-Petersburg: Politekhnikeskii universitet, 2009. 228 p.

8. Karinlovskii V.S. [et al.] Formirovanie sechenii i raschet ikh geometricheskikh kharakteristik [The formation cross sections and calculation of their geometric characteristics]. Kiev: Kompas, 2000. 80 p.

9. Spravochnik proektirovshchika. Metallicheskie konstruksii [Designer's manual. Metal construction]. Moscow: Assotsiatsiia stroitel'nykh vuzov, 1999, vol. 3.

Получено 27.05.2015

Об авторах

Нугуманова Альбина Дамировна (Пермь, Россия) – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: nugumanovaalbina@gmail.com).

Кашеварова Галина Геннадьевна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Строительные конструкции и вычислительная механика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ggk@pstu.ru).

About the authors

Albina D. Nugumanova (Perm, Russian Federation) – Student, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: nugumanovaalbina@gmail.com).

Galina G. Kashevarova (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Structures and Computational Mechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: ggk@pstu.ru).