

даної роботи є оптимізація параметрів процесу вигину штампованого алюмінієвого профілю, яка реалізовувалася чисельним моделюванням з використанням програмного забезпечення ABAQUS.

Програмне забезпечення ABAQUS засноване на методі кінцевих елементів для виконання віртуальних випробувань з використанням реалістичного моделювання, що допомагає скоротити витрати й час на розробку продукту, а також підвищити надійність виробів, що випускаються у машинобудуванні. Моделювання дозволяє знаходити та досліджувати критичні ділянки профілю в процесі їх формування. Використання програмного комплексу ABAQUS дозволило здійснити візуалізацію процесу вигину алюмінієвого профілю, дослідити дефекти, що виникають у процесі вигину профілю. Розглянуто найбільш деформовані області середньої частини профілю шляхом порівняння результатів моделювання й експериментів. Кореляція між результатами моделювання й експериментів доводить обґрунтованість встановленої чисельної моделі.

Для підвищення міцності алюмінієвого профілю рекомендовано змінити його внутрішню конструкцію, при цьому вага й дизайн профілю залишилися незмінними.

алюмінієвий профіль, процес вигину, чисельне моделювання, програмне забезпечення ABAQUS

Одержано 11.05.17

УДК 539.3

А.Ю. Лысых, канд. техн. наук

Первомайский политехнический институт НУК им. адмирала Макарова, г.Первомайск, Украина

E-mail: kobmargarita@mail.ru

Пространственное деформирование гибких конструкций, соединяющих судно-носитель и присоединенный объект

Приводится метод численного решения задачи колебания гибкого соединяющего звена морского назначения, основанный на совместном применении метода продолжения по параметру и метода Ньютона-Канторовича. Описаны способы приложения динамических нагрузок и постановки граничных условий. Приведены результаты решения задачи.

упругое деформирование, гибкий элемент, численные методы

А.Ю. Лысых, канд. техн. наук

Первомайський політехнічний інститут НУК ім. адмірала Макарова, м.Первомайськ, Україна

Просторова деформація гнучких конструкцій, які з'єднують судно-носії і присєднаний об'єкт

Розглянуто метод числового розв'язання задачі коливання гнучкої сполучаючої ланки морського призначення, побудований на сумісному застосуванні методу продовження по параметру і методу Ньютона-Канторовича. Описані способи додавання динамічних навантажень і постановки граничних умов. Наведені результати рішення задачі.

пружна деформація, гнучкий елемент, чисельні методи

Постановка проблеми. Проблема транспортування нафто- і газопродуктів с судна-носителя (СН) к присоединенному объекту (ПО) стала в последнее время особенно актуальной. Это обуславливает необходимость разработки и создания новых типов гибких конструкций, повышения их прочности и надежности. Таким соединяющим звеном могут быть гибкие армированные шланги, гибкие трубопроводы постоянной жесткости, гибкие бандажированные трубопроводы и т. п.

© А.Ю. Лысых, 2017

Сложные и тяжелые режимы работы системы СН-ПО сопряжены, как правило, с необходимостью специального изучения и определения действующих на них сил, учета сильной нелинейности разрешающих уравнений, возможности потери устойчивости равновесия, а также с требованием исследования поведения системы в закритических состояниях. Исследование этих процессов требует создания новых и модернизации известных математических моделей и алгоритмов, позволяющих, при определенных допущениях, оперативно определять напряженно-деформированное состояние гибкого соединяющего звена (ГСЗ) с помощью бортовых компьютерных систем.

ГСЗ представляют собой конструкции с усложненной геометрической структурой. Сложное очертание их осевой линии в произвольном временном отрезке эксплуатации вызвано различными факторами, в частности функциональным назначением конструкции. В общем случае криволинейные гибкие элементы подвергаются воздействиям произвольных статических (силовых или деформационных), а также динамических возмущений, обусловленных следующими факторами: силовым и кинематическим возбуждением гармонических колебаний; переносными, относительными и кориолисовыми силами инерции, вызванными сложным движением СН; гироскопическими силами; неконсервативными силами взаимодействия с внешними потоками; неоднородными центробежными силами инерции, возникающими при движении в ГСЗ.

Анализ последних исследований и публикаций. Решение таких задач оказывается возможным только современными методами нелинейного анализа, применение которых обуславливает выбор модификации разрешающих уравнений, обеспечивающих алгоритмичность и эффективность используемых подходов. До настоящего времени указанные исследования не получили необходимого развития из-за отсутствия достоверных математических моделей, которые могли бы достаточно просто и эффективно реализовываться в виде алгоритмов и программ для численного решения рассматриваемых задач.

Постановка задания. В данной работе рассматриваются вопросы напряженно-деформированного состояния ГСЗ некоторых конструктивных модификаций при действии статических или квазистатических нагрузок. В качестве базовой модели предлагается методика исследования деформирования гибких пространственно искривленных элементов, описанная в работах [1], [2]. При применении современных вычислительных алгоритмов с её помощью можно создать унифицированные методы исследования деформирования гибких подводных объектов, которые позволяют учитывать:

- неограниченность пространственного упругого деформирования;
- физико-геометрические параметры элементов с произвольными вдоль оси значениями изгибной и крутильной жесткостей;
- действие статических, квазистатических или динамических нагрузок, как угодно расположенных в пространстве;
- действие нагрузок от течения, волн, гидростатического давления.

Математическая модель базируется на известных подходах Лагранжа и Эйлера, которые описывают равновесие и деформирование гибкого элемента, его внешнюю и внутреннюю геометрию [4]. Ниже приведено краткое описание метода исследования.

Изложение основного материала. Введем исходные данные:

\bar{n} , \bar{b} , $\bar{\tau}$ – естественный трехгранник с единичными ортами главной нормали и касательной;

u, v, w – орты подвижного трехгранника;

\bar{F} , \bar{M} – векторы внутренних усилий и моментов;

p, q, r – кривизны относительно орт подвижного трехгранника;

x, y, z – координаты независимой переменной s .

Представим систему разрешающих уравнений, которые описывают деформирование гибкого элемента, в таком виде:

$$x' = f(x, s, \lambda), \quad (1)$$

$$\text{где } x(s) = (F_u(s), F_v(s), F_w(s), p(s), q(s), r(s), \tau_x(s), \tau_y(s), \tau_z(s), n_x(s); \\ n_y(s), n_z(s), b_x(s), b_y(s), b_z(s), x(s), y(s), z(s))^T \quad - \text{ вектор}$$

состояния ($m=18$),

f – вектор-функция правых частей системы уравнений;

λ – параметр интенсивности возмущения (нагружения).

Производная по s штрихом обозначена. Параметр λ может быть как действительным, так и формальным, отображающим количественные характеристики задачи.

Сформулированная таким образом в области $0 \leq s \leq S$ изменения независимой переменной s система разрешающих уравнений (1) имеет общий восемнадцатый порядок. Наличие шести первых интегралов

$$|\bar{\tau}| = 1, |\bar{n}| = 1, \bar{\tau}\bar{n} = 0, \bar{\tau} \times \bar{n} = \bar{b} \quad (2)$$

позволяет уменьшить ее порядок до двенадцатого. Методика решения поставленной задачи основана на совместном использовании метода продолжения по параметру и метода Ньютона-Канторовича. На краю $s=0$ интервала $0 \leq s \leq S$ изменения переменной s заданы шесть независимых краевых условий $\varphi[\bar{x}(0)] = 0$ и шесть вытекающих из первых интегралов уравнений связи $\bar{\theta}[\bar{x}(0)] = 0$. Для замыкания системы уравнений достаточно на краю $s=S$ задать шесть независимых краевых условий $\bar{\psi}[\bar{x}(s)] = 0$. В сформулированных краевых уравнениях $\bar{\varphi}, \bar{\theta}, \bar{\psi}$ обозначают шестимерные векторы-функции.

Пусть при некотором значении $\lambda = \lambda^{(n)}$ известно решение $\bar{x}^{(n)}(S)$. Дадим малое приращение $\delta\lambda^{(n)}$ параметра λ . Тогда соответствующую ему вариацию $\bar{\delta}\bar{x}^{(n)}(S)$ решения $x^{(n)}(S)$ можно найти из линейного уравнения

$$\frac{d\bar{\delta}\bar{x}^{(n)}}{ds} = \frac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{x}} \bar{\delta}\bar{x}^{(n)} + \frac{\partial \bar{f}}{\partial \lambda} \delta\lambda^{(n)}, \quad (3)$$

полученного линеаризацией системы разрешающих уравнений. Краевые уравнения для функции $\delta(x)^{(n)}$ формируются линеаризацией начальных нелинейных краевых уравнений

$$\frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \bar{x}} \bar{\delta}\bar{x}^{(n)}(0), \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{x}} \bar{\delta}\bar{x}^{(n)}(0), \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{x}} \bar{\delta}\bar{x}^{(n)}(S) = 0. \quad (4)$$

Для построения $\delta\bar{x}^{(n)}(S)$ выберем среди составляющих $\delta\bar{x}_i^{(n)}(S)(i=1,2,3,\dots,18)$ такие шесть компонент $\delta\bar{x}^{(n)}(S)$, любые значения которых $\delta_j^{(n)}(0)$ не изменяют первые два векторные уравнения системы (4). Перенумеруем неизвестные $\delta\bar{x}_i^{(n)}(S)(i=1,2,3,\dots,18)$ так, чтобы индекс j принимал значения значения $j=1,2,3,\dots,6$. Тогда решение задачи (4) можно представить в виде

$$\delta\bar{x}^{(n)}(s) = \bar{y}_\lambda \delta\lambda^{(n)} + Y(s)\delta\bar{c}^{(n)}, \quad (5)$$

где $\bar{y}_\lambda(s)$ – решение задачи Коши для системы

$$\frac{d\bar{y}_\lambda}{ds} = \frac{\partial \bar{f}}{\partial x} \bar{y}_\lambda + \frac{\partial \bar{f}}{\partial \lambda} \quad (6)$$

при нулевых начальных условиях,

$Y(s)$ – матрица размера $m \times 6$ решений системы

$$\frac{dv}{ds} = \frac{\partial f}{\partial x} y \quad (7)$$

с начальными условиями $y_j(0) = (\delta_1^j, \delta_2^j, \dots, \delta_6^j)(j=1,2,\dots,6)$ для независимых переменных, для других переменных – $y_i(0)(i=7,8,\dots,18)$.

Вектор постоянных $\delta c^{(n)} = \{\delta c_1^{(n)}, \delta c_2^{(n)}, \dots, \delta c_6^{(n)}\}$ подбирается из уравнений

$$\frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial \bar{x}} Y(S)\delta\bar{c}^{(n)} = -\frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial \lambda} \bar{y}_\lambda(S)\delta\lambda^{(n)}. \quad (8)$$

Выбирая состояние $x^{(n+1)}, \lambda^{(n+1)}$ как порождающее, вариацией параметра λ его можно продолжить на величину $\delta x^{(n+1)}$. Построение матриц $Y(s)$ на каждом шаге варьирования параметра λ осуществляется методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Количество шагов интегрирования и точек дискретизации по длине элемента зависит от многих факторов: количества и характера действующих по длине нагрузок, меры нелинейности процесса и т.п. Практическая реализация метода осуществляется в виде программ расчета на ЭВМ. При этом продолжительность расчета в зависимости от сложности задачи не превышает 15-20 мин для ПЭВМ с оперативной памятью 260 Мбт и частотой 2100 МГц.

При постановке граничных условий могут рассматриваться различные варианты закрепления концов ГПЗ. Для данного случая принимаем, что масса СН и масса ПО несоизмеримы, то есть $m_{СН} \gg m_{ПО}$, поэтому один из концов ГПЗ можно считать жестко заземленным, а другой – свободным. Деформирование гибкого упругого шланга за счет пространственного перемещения одного из его концов показано на рис. 1 в аксонометрической проекции и в проекциях на ортогональные плоскости.

Для такого случая деформирования принимались следующие граничные условия:

при $s=0$ – $F_u = 0, F_v = 0, F_w = 0, p = p_0, q = q_0, r = r_0$;

при $s=S$ – $\tau_x = \tau_x(0), \tau_y = \tau_y(0), n_z = n_z(0), F_u = 0, F_v = 0, F_w = 0$.

При этом на любом этапе деформирования в любом сечении или в агрегатном состоянии возможен визуальный контроль на дисплее необходимых характеристик напряженно-деформированного состояния. В качестве примера можно привести график (рис. 2), отображающий значения внутренних усилий в поперечных сечениях.

В общем случае на ГСЗ действует целый комплекс различных нагрузок. Такой нагрузкой может быть набегающее подводное течение, действующее под изменяющимся углом к осевой линии ГСЗ. Величина такой нагрузки задается известными соотношениями из гидромеханики.

Изменение же угла атаки отслеживается перераспределением значения параметра нагружения λ между трехгранниками x, y, z ; u, v, w ; n, b, τ :

$$\begin{aligned} F_u &= (P_x n_x + P_y n_y + P_z n_z) \cdot q / \sqrt{p^2 + q^2} + (P_x b_x + P_y b_y + P_z b_z) \cdot p / \sqrt{p^2 + q^2}, \\ F_v &= -(P_x n_x + P_y n_y + P_z n_z) \cdot p / \sqrt{p^2 + q^2} + (P_x b_x + P_y b_y + P_z b_z) \cdot q / \sqrt{p^2 + q^2}, \\ F_w &= P_x \tau_x + P_y \tau_y + P_z \tau_z. \end{aligned} \quad (10)$$

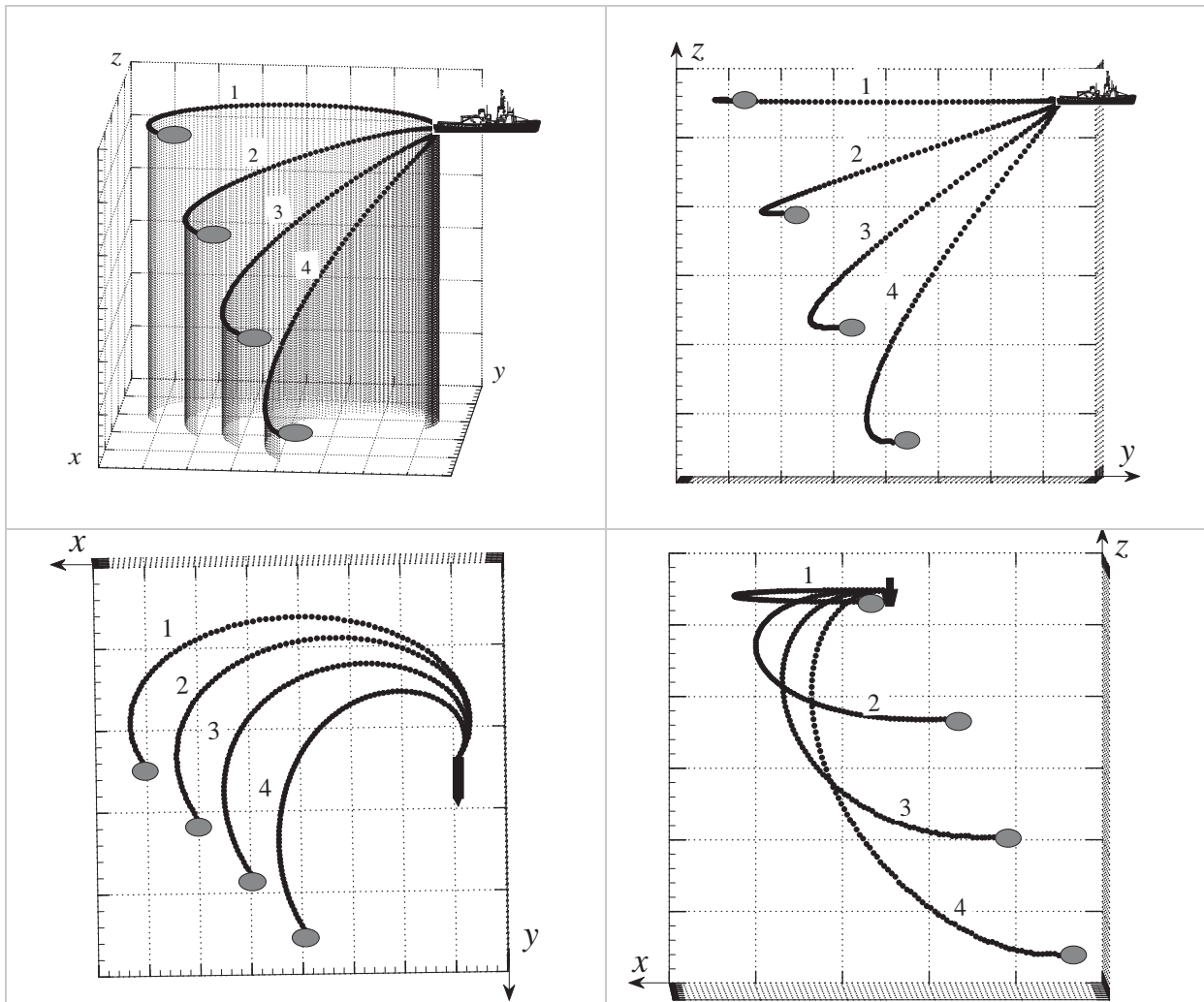


Рисунок 1 – Пространственные формы гибкой связи при перемещении свободного конца

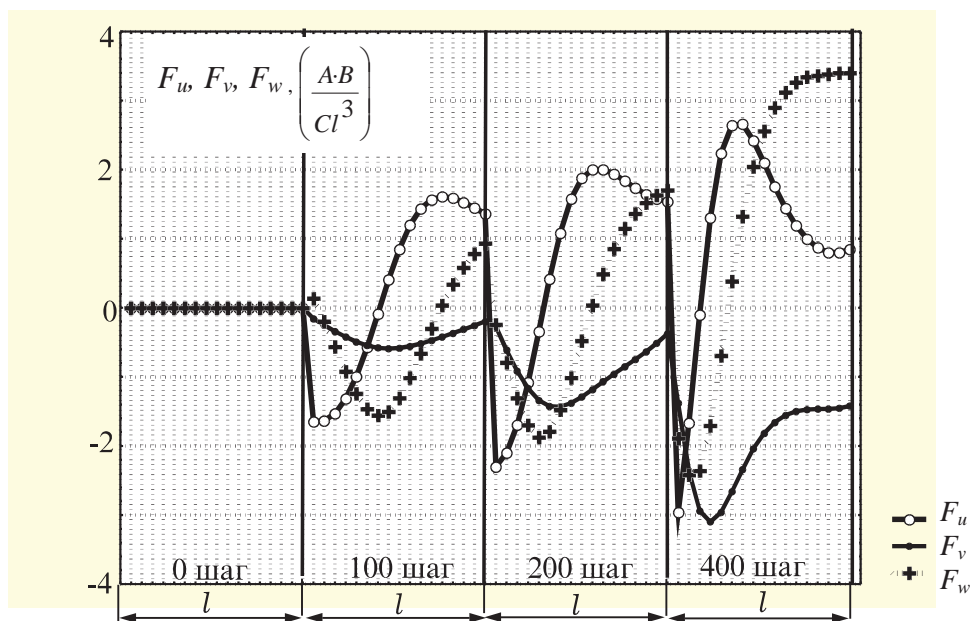


Рисунок 2 – Значения внутренних усилий на этапах деформирования

Задача динамического поведения гибкого криволинейного длинномерного элемента, связанного с судном-носителем, совершающим сложное пространственное движение, является довольно сложной, так как она описывается дифференциальными уравнениями с частными производными, в которые дополнительно включены переносные, относительные и кориолисовы силы инерции. Анализируя представленные в современной научной литературе данные о результатах решения таких задач, рассматриваемых в пределах упругости, можно отметить, что до настоящего времени не были разработаны универсальные аналитические подходы, позволяющие учитывать до конца основные эффекты, а также свойственные волновым и колебательным процессам, не решен ряд прикладных задач.

Выводы. Результаты решения ряда задач упругого деформирования и устойчивости гибких элементов со сложной пространственной геометрией позволяют сделать вывод, что с помощью разработанного метода можно исследовать изменение форм их упругого равновесия с учетом глубоких нелинейностей, а также анализировать устойчивость и закритическое поведение. Программы и алгоритмы позволяют адаптироваться к современным мощным программным пакетам типа Excel, Statistika и др. Достоверность метода проверена при решении ряда тестовых задач, а также экспериментально.

Список литературы

1. Гайдайчук, В.В. Экспериментально-теоретическое исследование пространственного деформирования гибкого упругого кольца [Текст] / В.В. Гайдайчук, Э.Ю. Бурменко, В.И. Кравцов, В.Н. Самилев, И.С. Пилишенко. – К., 1988. – 19 с. – Деп. в УкрНИИТИ 08.09.88, № 2268.
2. Гуляев В.И. Упругое деформирование гибких пространственно искривленных стержней [Текст] / В.В. Гайдайчук, В.Л. Кошкин, В.И. Кравцов // Известия ВУЗов. – 1988. – № 12. – С. 3-6.
3. Крижанівський, Є.І. Методологічні аспекти дослідження взаємозв'язку процесів деформації та руйнування трубопроводів [Текст] / Є.І. Крижанівський, Л.Я. Побережний // Нафтова і газова промисловість. – 2002. – № 5. – с. 37-44.
4. Кравцов, В.И. Механика гибких глубоководных систем [Текст] / В.И. Кравцов. – К.: Наукова думка, 1997. – 256 с.

Alla Lisikh, Phd tech. sci.

Pervomaisky polytechnic institute of the Mykolaiv university of shipbuilding of the name of admiral Makarov, Pervomaisk, Ukraine

Spatial deformation of flexible constructions, connecting ship-transmitter and the added object

Resilient deformation and stability of curvilinear flexible element of the marine setting is considered in the article, it is indicated on actuality of decision of this question.

The method of numerical decision of task of oscillation of flexible elements is offered with difficult spatial geometry, which allows to get the necessary parameters of the tensely-deformed state of flexible element at an action static and quasistatic tensions. For the decision of nonlinear regional task the method of continuation is used on a parameter jointly with the method of Newton-Kantorovich. Such approach allows effectively to use computational algorithms for the timely change of problem specification depending on technological necessities. By means of this methods it is possible to investigate the change of form of resilient equilibrium of flexible constructions taking into account deep non-linearity, to analyse stability and supercritical conduct. Examples of decision of such tasks which allow to draw conclusion about authenticity and efficiency of the used methods are made in the article.

The results of decision given in the article as computer graphics underline their authenticity, as one of signs of rightness of the got numerical decisions is convergence of differential equalizations.

resilient deformation, flexible element, numeral methods

Получено 10.05.17

УДК 621.9.048.4

О.Ф. Сіса, доц., канд. техн. наук, В.В. Пукалов, доц., канд. техн. наук, В.В. Юр'єв, асп.

Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна,

E-mail: sisaoleh@gmail.com

Технологія виготовлення порожнин високоміцних гайок спеціального призначення

Виконано обґрунтування технологічної схеми формоутворення поверхонь порожнини високоміцної гайки спеціального призначення, способом розмірної обробки електричною дугою з урахуванням особливостей фізичних механізмів їх утворення та гідродинамічних явищ в міжелектродному проміжку. Встановлені аналітичні зв'язки технологічних характеристик процесу розмірної обробки електричною дугою сталі 20Г2Р з режимами обробки і геометричними параметрами. **електрична дуга, гайка, технологія, технологічні характеристики, обладнання**

О. Ф. Сіса, доц., канд. техн. наук, В.В. Пукалов, доц., канд. техн. наук, В.В. Юр'єв, асп.

Центральноукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Україна

Технология изготовления полостей высокопрочных гаек специального назначения

Выполнено обоснование технологической схемы формообразования поверхностей полости высокопрочной гайки способом размерной обработки электрической дугой с учетом особенностей физического механизма образования и гидродинамических явлений в межэлектродном промежутке. Установлены аналитические связи технологических характеристик процесса размерной обработки электрической дугой стали 20Г2Р с режимами обработки и геометрическими параметрами.

электрическая дуга, гайка, технология, технологические характеристики, оборудование

© О.Ф. Сіса, В.В. Пукалов, В.В. Юр'єв, 2017