

УДК 658.512.22.011.56:004(076.5)

А.В. Бородуля¹, А.Н. Соловьев², В.В. Напрасников¹, М.А. Мирзаванд¹

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИИ КАРКАСА МОРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Рассматривается создание параметрической геометрической модели конструкции каркаса морской нефтедобывающей платформы с использованием специальных встроенных языков систем конечно-элементного моделирования, а также конечно-элементной модели этой конструкции с учетом эксплуатационных нагрузок. Описывается подготовка оптимизационной модели конструкции, выполняются оптимизационные расчеты и даются рекомендации по выбору рациональных параметров конструкции.

Введение

Потребности современного индустриального общества в углеводородном сырье постоянно растут. Одной из возможностей их удовлетворения являются разведка и добыча углеводородов на морском шельфе. В настоящее время в Исламской Республике Иран ведутся активные работы по разведке и добыче углеводородов на морском шельфе. При выполнении проектирования оборудования для таких работ возникают задачи, специфика которых предполагает необходимость разработки специальных моделей, позволяющих оценивать работоспособность, долговечность, ремонтпригодность сложных технических систем добычи и транспортировки углеводородов с учетом современных требований экологии и снижения их материалоемкости [1–3].

Цель настоящей работы – создание конечно-элементной модели конструкции каркаса морской нефтедобывающей платформы с учетом эксплуатационных нагрузок, на основе которой проектировщик получит возможность принимать обоснованные решения по выбору варианта конструкции минимальной материалоемкости.

Задачами исследования являются:

- создание параметрической геометрической модели конструкции каркаса морской нефтедобывающей платформы с использованием специальных встроенных языков систем конечно-элементного моделирования;
- создание конечно-элементной модели этой конструкции с учетом эксплуатационных нагрузок;
- подготовка оптимизационной модели конструкции;
- выполнение оптимизационных расчетов и выработка рекомендаций по выбору рациональных параметров конструкции.

1. Моделирование и решение задачи

Расчетная схема конструкции каркаса морской нефтедобывающей платформы изображена на рис. 1. Каркас остова изготовлен из шести типов труб, диаметры которых 4,26–8,208 м, а соответствующая толщина труб 0,12–0,206 м.

Для моделирования каркаса конструкции используется конечный элемент, расчетная схема которого показана на рис. 2, а, а для учета массы рабочего оборудования на верхнем уровне каркаса платформы – конечный элемент, расчетная схема которого показана на рис. 2, б.

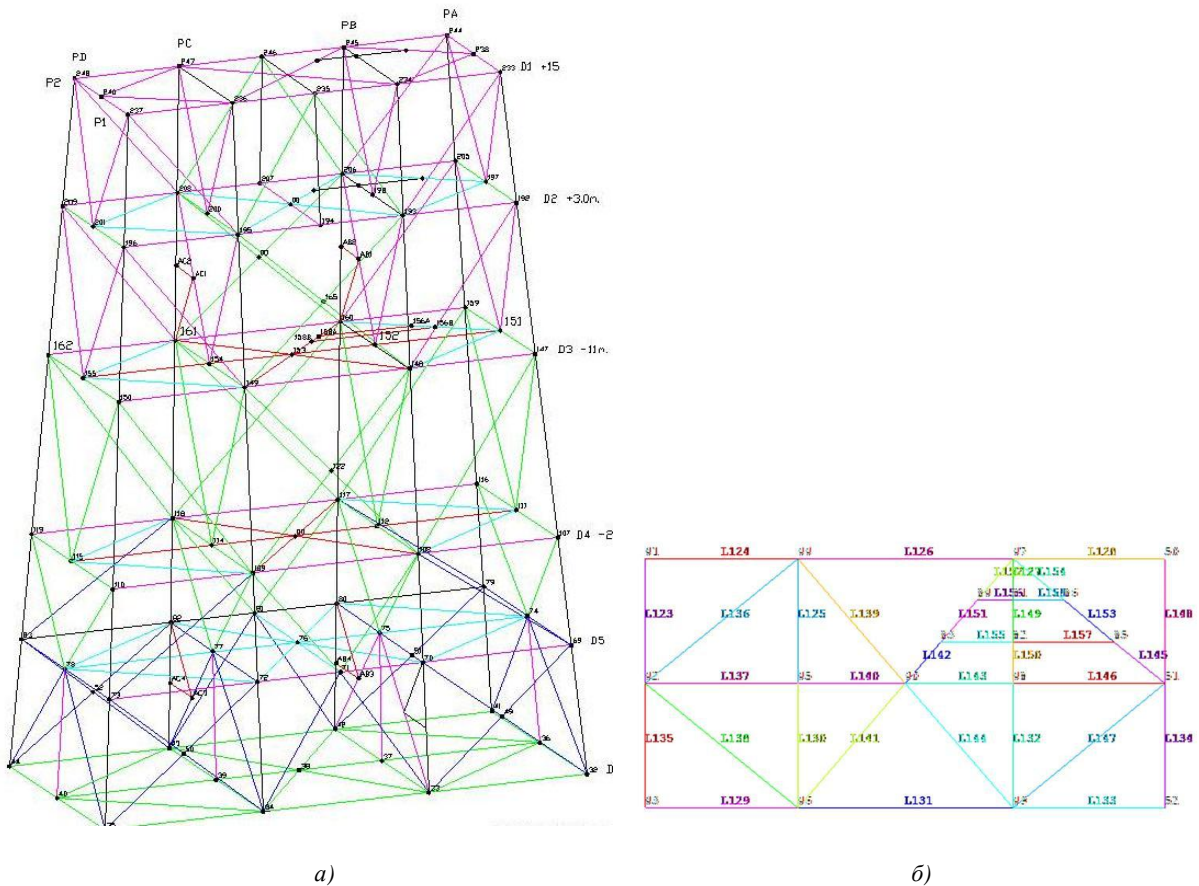


Рис. 1. Параметрическая геометрическая модель: а) остова; б) его подводного четвертого уровня

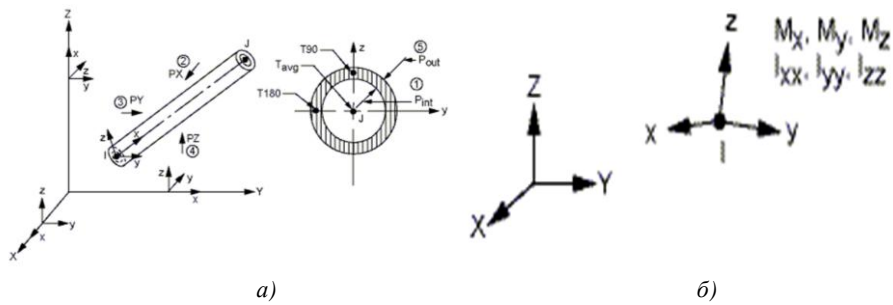


Рис. 2. Расчетные схемы конечных элементов: а) трубы; б) сосредоточенной массы

В модели данные величины и длина базовой части, ширина нулевого и пятого уровней, добавочная длина на пятом уровне, высоты всех уровней являются параметрами.

Численные эксперименты на основе предложенной модели показали:

– максимальные напряжения по Мизесу не превышают 25 МПа (рис. 3, а), что существенно ниже предела текучести материала конструкции. При этом наиболее нагруженными оказываются стойки каркаса;

– максимальные перемещения не превышают 0,0144 м (рис. 3, б), что допустимо по технологическим соображениям;

– коэффициенты запаса по устойчивости для первых шести форм составляют 54,908; 58,03; 60,085; 60,496; 61,214 и 61,398 соответственно.

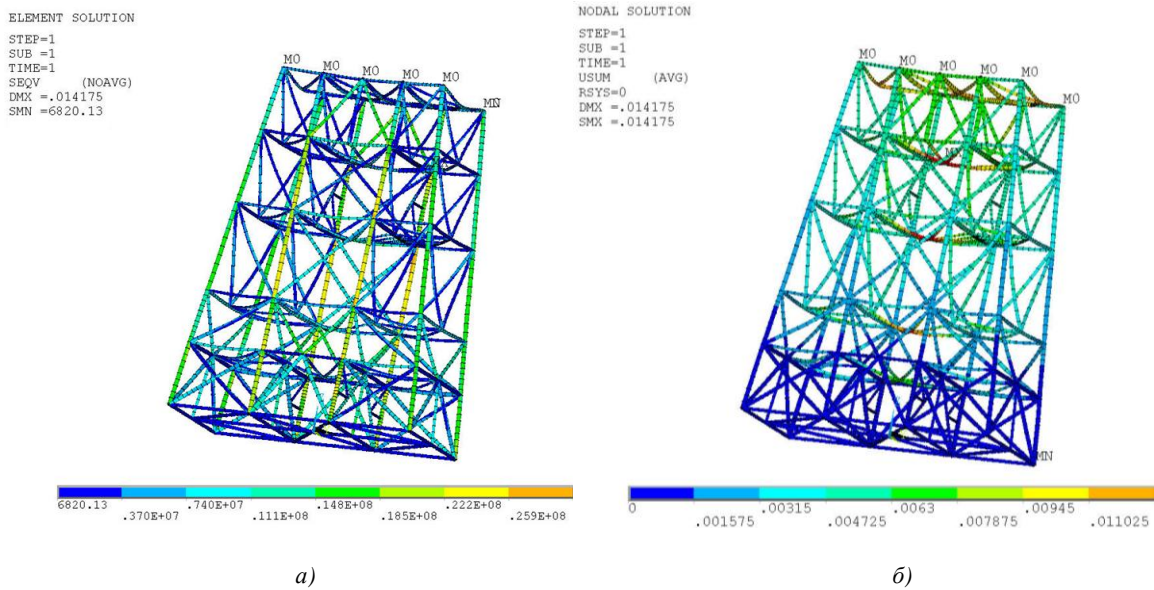


Рис. 3. Результаты моделирования: а) напряженное состояние конструкции; б) деформированное состояние конструкции

Таким образом, выявлен значительный запас прочности в материале конструкции. Это позволяет перейти к поиску более рационального варианта по критерию материалоемкости.

2. Оптимизация

Задачу оптимизации будем ставить следующим образом: найти $\min_{X \in D} F(X)$, где D – область пространства, в которой ведется поиск; X – m -мерный вектор переменных; $F(X)$ – заданная функция n переменных, определенная в области D . Предполагается, что функция $F(X)$ непрерывна в области D . Будем считать, что область D является m -мерным гиперпараллелепипедом с гранями, параллельными координатным осям:

$$D = \{X \in R^m \mid x_{i \text{ inf}} \leq x_i \leq x_{i \text{ sup}}, \quad i = \overline{1, m}\}. \quad (1)$$

Наложим ограничения на множество векторов X , ограничив их m -мерным гиперпараллелепипедом. В общем случае оптимальное значение X в зависимости от вида вектор-функции $F(X)$ может быть точкой либо локального, либо глобального минимума.

Определим вектор X^* как точку локального минимума, если для всех точек X^* , принадлежащих ε -окрестности точки X^* , выполняется следующее неравенство: $F(X^*) \leq F(X)$, где $X \in D_i$, $D_i \subset D$, $D_i = \{X \in R^m \mid x_i - \varepsilon \leq x_i \leq x_i + \varepsilon, \quad i = \overline{1, m}\}$.

Определим глобальный минимум $F(X)$ как наименьший из всех локальных, т. е. точка X^* является точкой глобального минимума на области, определенной выше, если справедливо неравенство

$$F(X^*) \leq F(X), \quad \forall X \in D.$$

Анализ литературы и опыт разработок показали, что наиболее эффективным методом поиска экстремума для данных моделей с точки зрения машинной реализации является расчет функционала на сетке точек с последующим уточнением полученного экстремума. Для построения сетки точек, равномерно заполняющих данную область, удобно использовать

$LP\tau$ -последовательности [4]. Следует отметить, что среди известных в настоящее время равномерно распределенных последовательностей наилучшие характеристики при $M \rightarrow \infty$, где M – количество точек, имеют $LP\tau$ -последовательности. Подробно методы генерации и доказательство равномерности распределения $LP\tau$ -последовательностей описаны в [4–6].

Рассмотрим область C – m -мерный единичный гиперкуб:

$$C = \{X \in R^m \mid 0 \leq x_i \leq 1, \quad i = \overline{1, m}\}.$$

Пусть M – количество точек ω_j , $(j = \overline{1, M})$, принадлежащих области C . Из свойств равномерного распределения $LP\tau$ -последовательностей следует, что выполняется условие $\lim_{M \rightarrow \infty} \frac{M_G}{M} = \sqrt{G}$, где G – любая m -мерная область, подобласть C ; M_G – количество точек $LP\tau$ -последовательности, принадлежащих области G ; M – количество точек $LP\tau$ -последовательности; \sqrt{G} – объем m -мерной области G [4]. При больших значениях M количество точек, попавших в произвольную область G , пропорционально объему этой области.

Сохраняя равномерность расположения точек, с помощью линейного преобразования точки ω_j , $j = \overline{1, M}$, равномерно заполняющие m -мерный единичный гиперкуб C , можно преобразовать в точки, равномерно заполняющие произвольный гиперпараллелепипед D , который удовлетворяет условиям (1).

Сформулируем оптимизационную задачу следующим образом:

критерий оптимизации (целевая функция) $F(X)$ – объем материала конструкции;

варьируемые параметры (переменные конструкции) X – m -мерный вектор переменных. Его компоненты – диаметры трубы первого типа (стойки) и трубы второго типа (наиболее массивной перемычки) – могут изменяться в пределах от 0,5 до 1,0 м;

функциональное ограничение (переменная состояния) – максимальное напряжение по Мизесу в материале конструкции – не должно превышать заданный уровнем 200 МПа.

Результаты поиска представлены ниже. Здесь в качестве примера отображены вычисленные значения для вариантов 1, 2, 3, 17, 18, 19. Из 21 рассмотренного варианта наилучшим оказался вариант 17:

	SET 1 (FEASIBLE)	SET 2 (FEASIBLE)	SET 3 (FEASIBLE)
STRESS_MAX (SV)	0.24544E+08	0.22654E+08	0.27719E+08
D1 (DV)	0.82080	0.92359	0.69400
D2 (DV)	0.72000	0.72859	0.84618
TOTAL_VOL (OBJ)	110.64	115.52	107.75
	SET 17 (FEASIBLE)	SET 18 (FEASIBLE)	SET 19 (FEASIBLE)
STRESS_MAX (SV)	0.27701E+08	0.26867E+08	0.28737E+08
D1 (DV)	0.68390	0.72657	0.65904
D2 (DV)	0.51099	0.92147	0.80708
TOTAL_VOL (OBJ)	99.604	110.96	105.26

На рис. 4 представлена динамика изменения объема конструкции в зависимости от номера итерации. При этом максимальное напряжение по Мизесу в материале конструкции увеличилось до 27 МПа, максимальные перемещения увеличились до 0,0156 м, а объем уменьшился до 99,604 м³ против 110,64 м³ в исходном варианте.

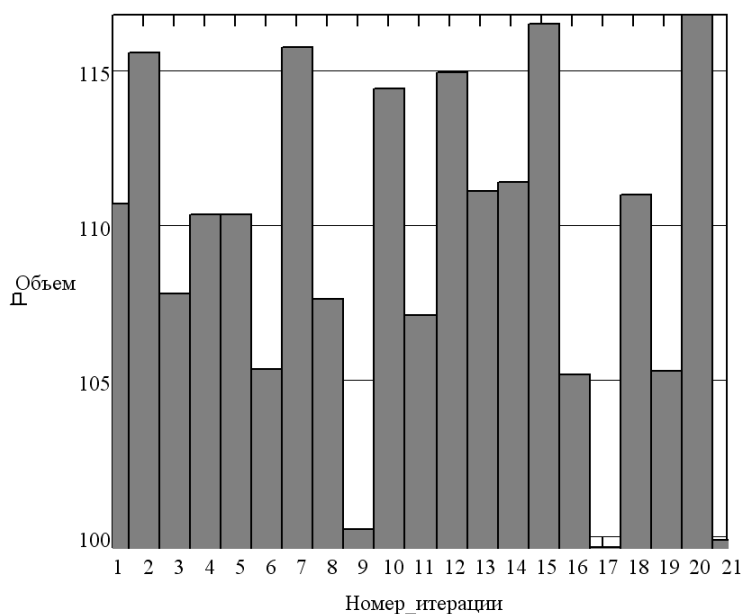


Рис. 4. Динамика изменения объема конструкции

Проверим коэффициенты запаса устойчивости для первых шести форм потери устойчивости. В оптимальном варианте они составляют 38,141; 40,167; 40,469; 41,389 и 41,788 соответственно, что обеспечивает достаточную устойчивость конструкции (рис. 5).

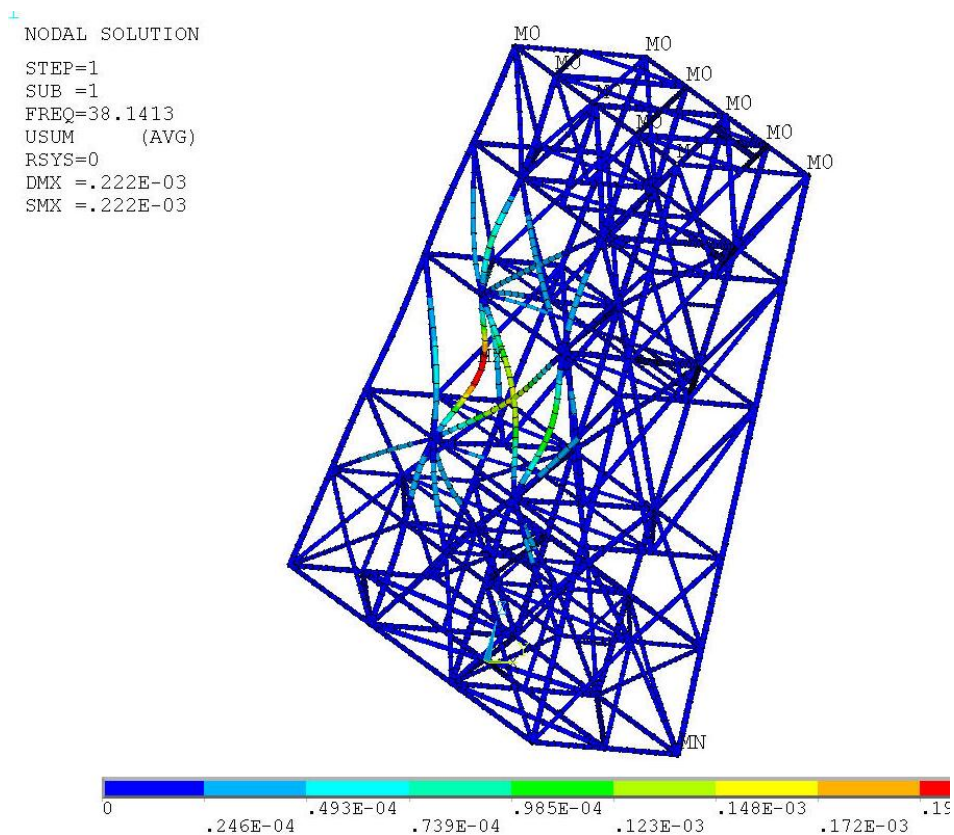


Рис. 5. Первая форма потери устойчивости оптимальной конструкции

Заключение

В ходе выполнения работы получены следующие результаты:

– создана параметрическая геометрическая модель конструкции каркаса остова морской нефтедобывающей платформы с использованием языка APDL системы конечно-элементного моделирования ANSYS;

– создана конечно-элементная модель данной конструкции с учетом эксплуатационных нагрузок, при этом для моделирования каркаса конструкции используется конечный элемент PIPE20, а для учета массы рабочего оборудования на верхнем уровне каркаса платформы – конечный элемент MASS21;

– подготовлена оптимизационная модель конструкции. Из 23 параметров конечно-элементной модели в качестве варьируемых выбраны два, к которым наиболее чувствительна результирующая масса конструкции, – это диаметры трубы первого типа (стойки) и трубы второго типа (наиболее массивной перемычки);

– выполнены оптимизационные расчеты и выработаны рекомендации по выбору рациональных параметров конструкции. При этом оказалось, что диаметр трубы первого типа следует выбрать размером 0,68390 м, а диаметр трубы второго типа – размером 0,51099 м;

– выполнена проверка оптимального варианта на устойчивость. Установлено, что коэффициент запаса устойчивости для первой формы составляет 38,141;

– экономия материала (стали) в предложенном варианте конструкции составляет более 10 м³.

В дальнейшем предполагается выполнить проверку оптимального варианта конструкции на сопротивление сейсмическим нагрузкам, характерным для регионов Ирана, в которых предполагается использование этих систем.

Представленный спектр конечно-элементных моделей позволяет обоснованно выбирать рациональные варианты подобных проектов сложных технических систем добычи и транспортировки углеводородов на морском шельфе. Полученные результаты используются в учебном процессе кафедры САПР БНТУ.

Список литературы

1. Информационный программно-технический комплекс для дистанционного решения сложных прикладных задач на основе использования суперкомпьютерных систем / В.А. Кочуров [и др.] // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2010. – № 2. – С. 86–96.

2. Построение спектра конечно-элементных моделей для принятия рациональных инженерных решений при ремонте морских платформ / А.В. Бородуля [и др.] // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2013. – № 4. – С. 101–107.

3. Mirzavand, M. Construction of the spectrum of finite element models for the rational design of complex technical production systems and transportation of hydrocarbons offshore / M. Mirzavand, H. Izadneshan // Pensee J. – 2014. – Vol. 76, no. 2. – P. 348–356.

4. Соболев, И.М. Точки, равномерно заполняющие многомерный куб / И.М. Соболев. – М. : Знание, 1985. – 32 с.

5. Соболев, И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. – М. : Наука, 1981. – 193 с.

6. Методы оптимизации / под ред. В.С. Зарубин, А.П. Крищенко. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 440 с.

Поступила 02.07.2014

¹Белорусский национальный технический университет,
Минск, пр. Независимости, 65
e-mail: n_v_v@tut.by

mohsen.mirzavand@yahoo.co.uk

²Донской государственный технологический университет,
Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
e-mail: solovievarc@gmail.com

A.V. Borodulia, A.N. Soloveev, V.V. Naprasnikov, M.A. Mirzavand

**CHOICE OF RATIONAL PARAMETERS OF THE FRAME CONSTRUCTION
OF OFFSHORE PLATFORM**

Creation of a parametric geometrical model of the frame construction of offshore oil platform using special built-in languages of finite-element modeling systems and finite-element model of the construction subject to operational loads is considered. Preparation of an optimization construction model is described, optimization calculations are carried out and recommendations on choosing rational construction parameters are given.