

УДК 658.512.22.011.56:004(076.5)

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

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ КЕССОННОЙ КОНСТРУКЦИИ

Рассматривается создание параметрической геометрической модели конструкции бокса сухой сварки для ремонта остова 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

При выполнении работ по проектированию, установке, эксплуатационному ремонту и демонтажу соответствующего оборудования для разведки и добычи углеводородов на морском шельфе возникает ряд задач, решение которых предполагает необходимость разработки специальных моделей, позволяющих ответить на вопросы о работоспособности, долговечности, ремонтпригодности сложных технических систем добычи и транспортировки углеводородов с учетом современных требований экологии. Такие работы ведутся в настоящее время в Исламской Республике Иран, с которой Республика Беларусь поддерживает и развивает отношения долгосрочного партнерства и сотрудничества [1–6].

Целью настоящего исследования является разработка конечно-элементных моделей, позволяющих принимать обоснованные решения по рациональному проектированию компонентов конструкций для ремонта морских платформ с учетом эксплуатационных нагрузок.

1. Основные задачи исследования

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие основные задачи:

- создать параметрическую геометрическую модель компонентов конструкций для ремонта морских платформ с использованием специальных встроенных языков систем конечно-элементного моделирования;
- исследовать возможности выполнения поиска конструкции бокса сухой сварки для ремонта остова нефтедобывающей платформы с использованием параметрической конечно-элементной модели;
- создать конечно-элементную модель этой конструкции с учетом эксплуатационных нагрузок;
- подготовить оптимизационную модель конструкции;
- выполнить оптимизационные расчеты и выработать рекомендации по выбору рациональных параметров конструкции.

2. Моделирование и решение задач

Рассмотрим примеры реализации перечисленных выше задач для ситуации, когда необходимо дать ответ на вопрос о возможности проведения ремонта в подводной части конструкции морской нефтедобывающей платформы [2–4].

Из рис. 1 видно, что конструкция частично ослаблена. Ремонт предполагает замену поврежденной части конструкции (рис. 2) путем вырезания дефектного участка с помощью сварки и приваривания накладки.



Рис. 1. Пример дефекта в подводной части конструкции морской платформы

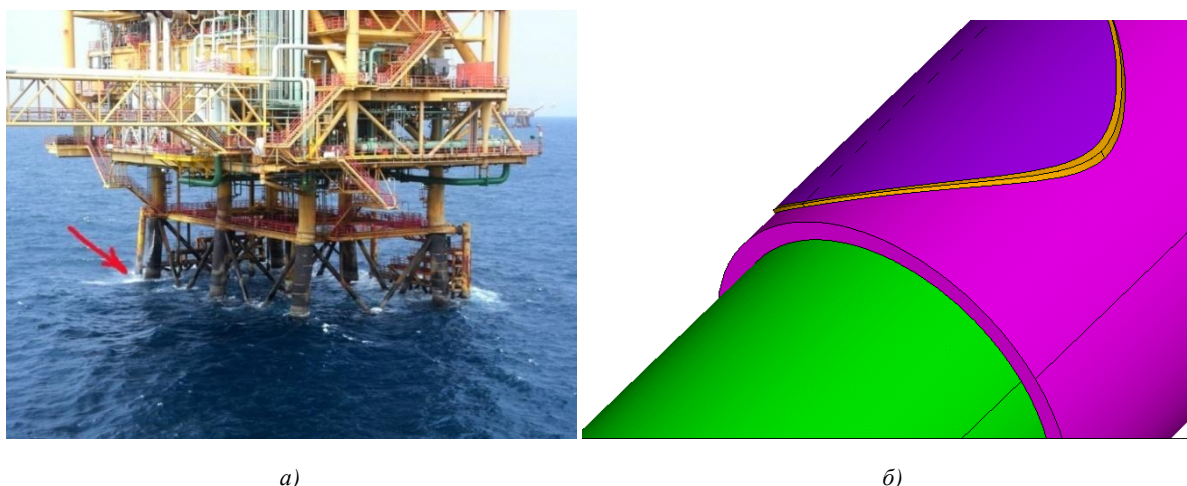


Рис. 2. Расположение поврежденной части морской платформы рядом с причальным устройством (а) и ее параметрическая геометрическая модель с учетом сварного шва и накладки (б)

Максимальное напряжение, возникающее в конструкции с вырезанным дефектным участком при рабочем нагружении, составляет 34,2 МПа и не превышает допустимое для материала конструкции. Таким образом, ремонт, предполагающий вырезание поврежденной части конструкции и приваривание упрочняющей накладки, возможен.

Ремонтные работы для восстановления конструкции предусматривают выполнение сухой сварки. Для этого необходимо спроектировать погружаемый бокс, заполняемый воздухом, внутри которого должна быть расположена часть конструкции, подвергающаяся ремонту. Виды геометрии конструкций двух возможных вариантов таких боксов, подготовленных с использованием соответствующих параметрических моделей, представлены на следующих рисунках.

В первом варианте бокса (рис. 3) предусмотрен каркас из уголков. Основные геометрические параметры модели – это высота уровней обвязки уголками и размеры пластин, указанные на рис. 3. На рис. 4 представлены конечно-элементная расчетная схема и распределение перемещений в материале конструкции при погружении на глубину расположения дефекта.

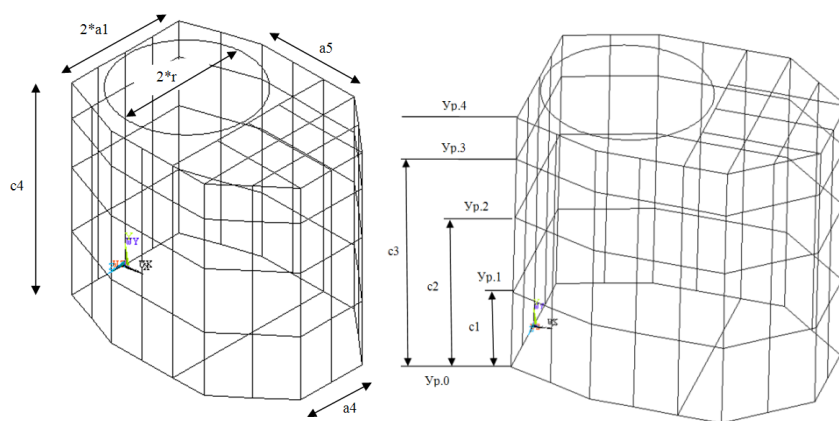


Рис. 3. Основные геометрические параметры модели первого варианта бокса

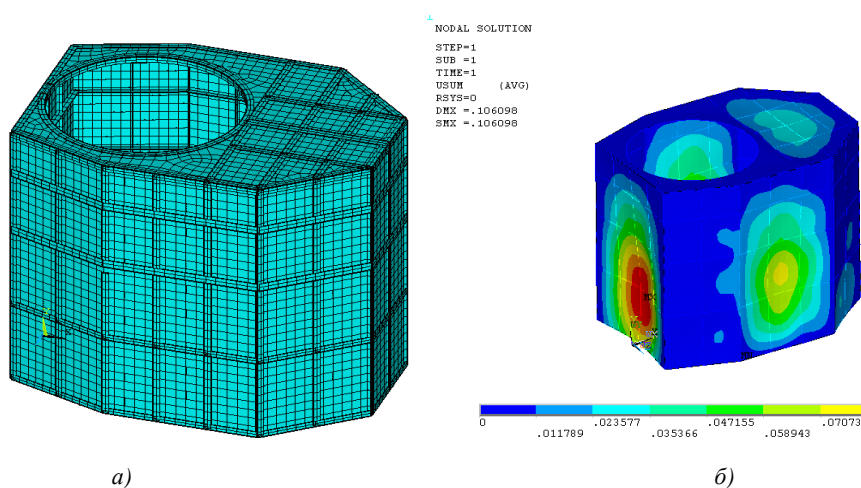


Рис. 4. Геометрия конструкции первого варианта кессона (а) и суммарные перемещения (б) при погружении на рабочую глубину

Во втором варианте бокса (рис. 5) каркас отсутствует. Для этой модели параметрами являются геометрические размеры, указанные на рис. 5, и толщина цилиндрической поверхности кессона. Основание и крышка представлены достаточно мощными стальными пластинами, боковая стенка представляет собой относительно тонкий стальной лист. Закрепление кессона осуществляется в нескольких местах. Сверху он плотно прикрепляется к опорной колонне с помощью манжет, снизу прикреплен четырьмя тросами ко дну.

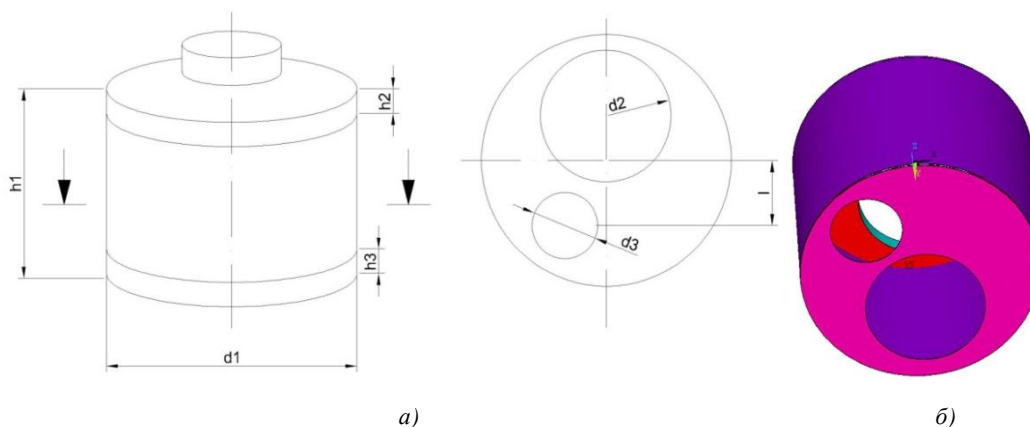


Рис. 5. Геометрия конструкции второго варианта кессона (а) и напряжения по Мизесу в материале его конструкции (б) при погружении на рабочую глубину

Результаты расчета напряжений в материале конструкции по теории прочности Мизеса для варианта со значениями параметров $d1 = 4$ м, $d2 = 2$ м, $d3 = 1,5$ м, $h1 = 3$ м, $h2 = 0,1$ м, $h3 = 0,1$ м и толщиной стенки $h4 = 0,004$ м представлены на рис. 6.

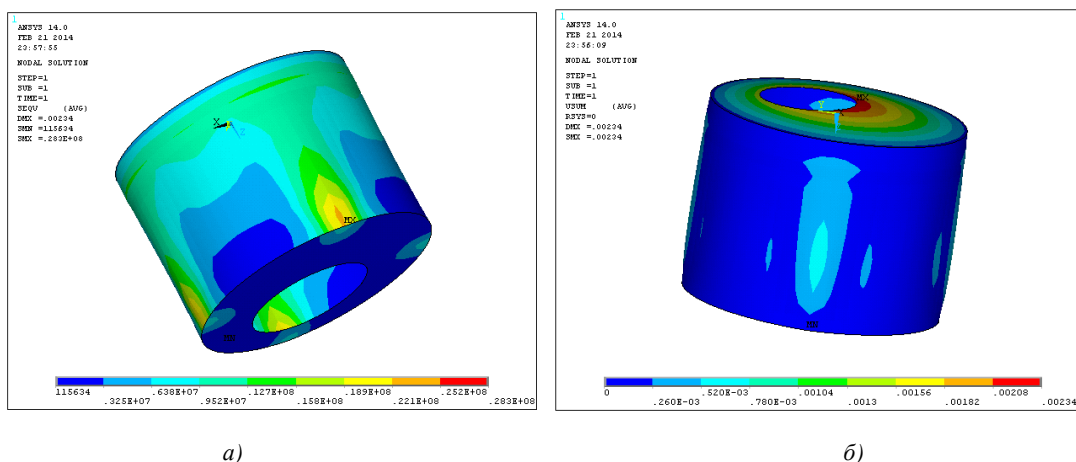


Рис. 6. Распределение напряжений по Мизесу в материале конструкции кессона при погружении на рабочую глубину (а) и суммарных перемещений (б)

Анализ напряженно-деформированного состояния кессона показывает, что напряжения, возникающие в материале конструкции, составляют 23 МПа и не превосходят соответствующих допустимых значений для материала конструкции. При этом максимальные суммарные перемещения возникают на нижней пластине в районе водолазного входа и на боковой поверхности и не превышают 0,0046 м.

Таким образом, предложенные модели позволяют выбрать второй вариант кессона [2, 3], поскольку технологически его изготовление значительно проще, чем для первого варианта. Далее встает задача выбора рационального варианта конструкции.

3. Оптимизация

Поставим задачу параметрической оптимизации. Оптимизация позволяет расчетным путем найти наиболее эффективное сочетание параметров изделия прежде, чем начинать изготовление опытных экземпляров.

Общая задача многокритериальной минимизации с m независимыми переменными, n целями, p ограничениями в виде неравенств и q ограничениями в виде равенств [7–9] выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} f(x) \rightarrow \min, \\ g(x) \geq 0, \\ h(x) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $x = (x_1, \dots, x_m) \in X$, x – вектор решений (независимых переменных);

X – пространство параметров;

$f(x)^T = [f_1(x), \dots, f_n(x)]$ – цели;

$g(x)^T = [g_1(x), \dots, g_p(x)]$ – ограничения в виде неравенств;

$h(x)^T = [h_1(x), \dots, h_q(x)]$ – ограничения в виде равенств.

В рассматриваемом случае компонентами вектора X являются толщина верхней крышки $h2$ (изменяется от 0,05 до 0,2 м), толщина нижней крышки $h3$ (изменяется от 0,05 до 0,2 м) и толщина боковой стенки $h4$ (изменяется от 0,002 до 0,06 м).

Переменной состояния является напряжение по Мизесу в материале конструкции (не должно превышать 200 МПа, что соответствует второму из ограничений вида (1)), целевой функцией $f(x)$ является объем материала конструкции.

При решении задачи оптимизации в среде ANSYS использовался метод первого порядка, который применяет информацию о производных зависимых переменных относительно переменных проекта. Этот метод очень точен и хорошо решает задачи с большими диапазонами изменения зависимых переменных, однако требует значительных вычислительных ресурсов [10].

Задача формулируется в виде

$$Q(x, q) = \frac{f}{f_0} + \sum_{i=1}^n P_x(x_i) \left(\sum_{i=1}^{m_1} P_g(g_i) + \sum_{i=1}^{m_2} P_h(h_i) + \sum_{i=1}^{m_3} P_w(w_i) \right), \quad (2)$$

где Q – безразмерная целевая функция; P_x, P_g, P_h, P_w – штрафы, которые зависят от переменных состояния; f_0 – начальное значение целевой функции.

При использовании метода первого порядка программа преобразует оптимизационную задачу с ограничениями в задачу без ограничений (2), а затем на каждой итерации вычисляет градиент целевой функции по переменным проекта. Для вычисления каждой частной производной программа присваивает небольшое приращение соответствующей переменной проекта, оставляя значения других переменных проекта прежними, и производит расчет конструкции с данным набором параметров.

После вычисления всех частных производных определяется направление поиска экстремума на данной итерации. Следует отметить, что в общем случае поиск осуществляется не в направлении градиента. Для определения направления поиска используется более сложная зависимость. Затем осуществляется линейный поиск экстремума целевой функции по данному направлению.

Пользователь может указать приращения переменных проекта, используемые для вычисления градиента, а также предельное значение шага линейного поиска. Таким образом, каждая итерация разделяется на набор субитераций, который включает поиск направления и вычисление градиента. В связи с этим одна оптимизационная итерация для метода первого порядка включает в себя несколько циклов анализа.

Найденный таким образом экстремум используется в качестве исходной точки для следующей итерации и т. д. Итерации продолжаются до тех пор, пока не будет достигнута сходимость или условия прерывания процесса оптимизации. Задача считается сошедшейся, если текущий, предыдущий и наилучший проекты (наборы параметров) таковы, что выполняется одно из следующих условий:

- разность значений целевой функции между лучшим проектом и текущим проектом меньше погрешности сходимости целевой функции;
- разность значений целевой функции между предыдущим проектом и текущим проектом меньше погрешности сходимости целевой функции.

Результаты использования данного метода применительно к описанной задаче представлены на рис. 7.

```

LIST OPTIMIZATION SETS FROM SET 1 TO SET 5 AND SHOW
ONLY OPTIMIZATION PARAMETERS. (A "*" SYMBOL IS USED TO
INDICATE THE BEST LISTED SET)

```

	SET 1 (FEASIBLE)	SET 2 (FEASIBLE)	SET 3 (FEASIBLE)	*SET 4* (FEASIBLE)
STRESS_MAX(SU)	0.23261E+08	0.76816E+08	0.76824E+08	0.78308E+08
H2 (DV)	0.10000	0.50000E-01	0.50000E-01	0.50000E-01
H3 (DV)	0.10000	0.52450E-01	0.50000E-01	0.50000E-01
H4 (DV)	0.40000E-02	0.38252E-02	0.38183E-02	0.20000E-02
TOTAL_UOL(OBJ)	2.1732	1.1785	1.1551	1.0866

	SET 5 (FEASIBLE)
STRESS_MAX(SU)	0.78308E+08
H2 (DV)	0.50000E-01
H3 (DV)	0.50000E-01
H4 (DV)	0.20000E-02
TOTAL_UOL(OBJ)	1.0866

Рис. 7. Результаты оптимизации (символом ‘*’ отмечен наилучший набор параметров)

Динамика изменения объема материала в зависимости от номера итерации показана на рис. 8, а.

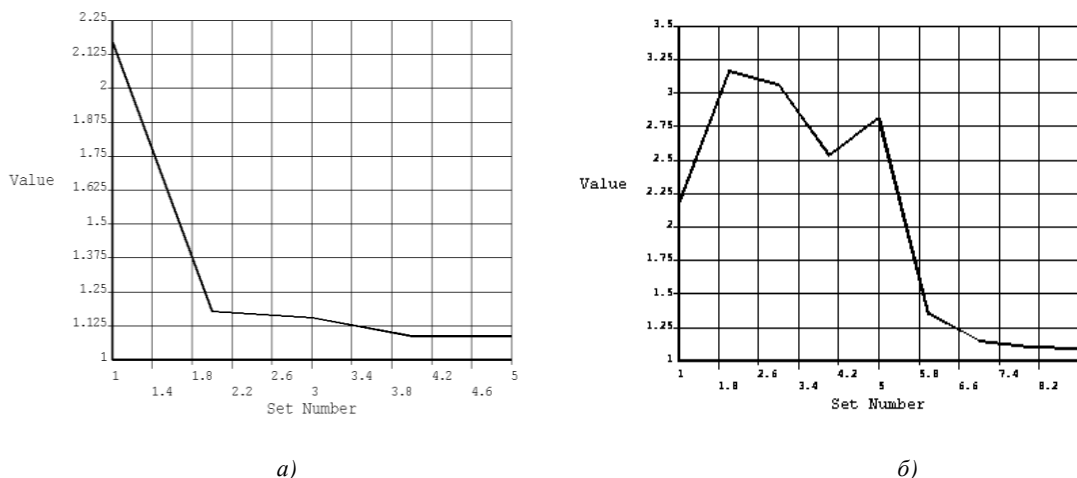


Рис. 8. Динамика изменения объема материала в зависимости от номера итерации: а) метод первого порядка; б) метод квадратичной аппроксимации (с отсутствием перекрестных членов)

Для того чтобы исключить возможность скатывания в локальный максимум, оптимизационные вычисления были выполнены и другими методами и средствами оптимизации. В частности, использовался метод квадратичной аппроксимации с отсутствием перекрестных членов.

Целевая функция может быть записана в квадратичном виде (с перекрестными членами):

$$\hat{f} = a_0 + \sum_i^n a_i x_i + \sum_i^n \sum_j^n b_{ij} x_i x_j.$$

Норма наименьшей взвешенной квадратичной ошибки для целевой функции определяется формулой

$$E^2 = \sum_{j=1}^{n_d} \varphi^{(j)} \left(f^{(j)} - \hat{f}^{(j)} \right)^2,$$

где $\varphi^{(j)}$ – весовой коэффициент, связанный с набором параметров; n_d – число наборов параметров.

Результаты использования метода квадратичной аппроксимации с отсутствием перекрестных членов показаны на рис. 8, б. При этом потребовалось девять итераций, минимальный объем конструкции составил $1,0968 \text{ м}^3$.

В дополнение к двум методам оптимизации в программе ANSYS доступны пять различных средств оптимизации, которые применяются для определения области варьирования параметров проекта. Они обеспечивают не оптимизацию целевой функции, а автоматическое получение нескольких наборов параметров проекта при определенном законе изменения переменных проекта. Для использования этих средств не требуется наличие целевой функции, однако переменные проекта должны быть определены.

Сканирование области варьирования параметров создает заданное количество наборов параметров, поочередно варьируя каждую переменную проекта в исходном наборе параметров через весь диапазон ее изменения. Значения других переменных проекта при этом остаются неизменными. При использовании этого средства после 16 итераций минимальный объем конструкции составил $1,6332 \text{ м}^3$.

Наконец, используем средство «случайное варьирование». Сгенерируем в пространстве переменных проекта 20 точек. При этом найденный минимальный объем конструкции составил $1,3092 \text{ м}^3$. Результаты оптимизационных вычислений сведены в таблицу.

Результаты оптимизации	Методы и средства оптимизации			
	Случайное варьирование	Квадратичная аппроксимация (с отсутствием перекрестных членов)	Сканирование области варьирования параметров	Метод первого порядка
Количество итераций	21	9	31	5
$h2, м \cdot 10^{-1}$	0,55363	0,50493	0,50000	0,50000
$h3, м \cdot 10^{-1}$	0,57355	0,50445	0,50000	0,50000
$h4, м \cdot 10^{-2}$	0,45299	0,20190	0,40000	0,20000
Эквивалентное напряжение по Мизесу, МПа	62,27	76,71	76,39	78,23
Объем материала конструкции, м ³	1,3092	1,0968	1,1620	1,0866
Время расчета, с	157,344	72,188	242,547	198,391

Заключение

Выполненные исследования позволили получить следующие результаты:

- с использованием языка APDL системы конечно-элементного моделирования ANSYS создана параметрическая геометрическая модель конструкции бокса сухой сварки для ремонта остова нефтедобывающей платформы, а также конечно-элементная модель этой конструкции с учетом эксплуатационных нагрузок;

- представлен спектр конечно-элементных моделей, который позволяет обоснованно выбирать рациональные варианты проектов сложных технических систем добычи и транспортировки углеводородов на морском шельфе;

- с помощью построенных моделей выполнен поиск рациональных параметров водолазного кессона для сухой сварки. При этом удалось снизить объем материала конструкции до 1,0866 м³ против 2,1732 м³ в исходном проектном варианте;

- подготовлена оптимизационная модель конструкции;

- выполнены оптимизационные расчеты и выработаны рекомендации по выбору рациональных параметров конструкции;

- проведена проверка оптимального варианта на устойчивость;

- получена экономия материала (стали).

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. Выбор рациональных параметров конструкции каркаса морской платформы / А.В. Бородуля [и др.] // Информатика. – 2014. – № 3(43). – С. 89–95.

4. 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 Journal. – 2014. – Vol. 76, № 2. – P. 348–356.

5. Zhu, S. Numerical calculation of forces induced by shortcrested waves on a vertical cylinder of arbitrary cross-section / S. Zhu, G. Moule // Ocean Engineering. – 1994. – Vol. 21, № 7. – P. 645–662.

6. Dong, P. A structural stress definition and numerical implementation for fatigue analysis of welded joints / P. Dong // International Journal of Fatigue. – 2001. – Vol. 23. – P. 865–876.

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

8. Соболев, И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. – М. : Наука, 1981. – С. 193.
9. Методы оптимизации / под ред. В.С. Зарубин, А.П. Крищенко. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 440 с.
10. Tang, W.H. Uncertainties in offshore axial pile capacity / W.H. Tang // Foundation Engineering: Current Principles and Practices. – NY, 1989. – P. 833–847.

Поступила 18.03.2015

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

M.A. Mirzavand¹, A.V. Borodulia¹, A.N. Soloveev², V.V. Naprasnikov¹

PARAMETRIC FINITE ELEMENT MODEL OF A CAISSON CONSTRUCTION

This research is devoted to the creation of a finite element model of a dry welding box for repairing core oil platform taking into account operational loads.