

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ УПРУГОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ВОЛНОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

А.В. Александров, О.Е. Литонов, Е.В. Соболева

В работе проведено исследование волновых нагрузок на одиночную цилиндрическую колонну с помощью программного комплекса ANSYS. Рассмотрено волновое воздействие на пространственную конструкцию, являющуюся прообразом самоподъемной плавучей буровой установки. Волновые нагрузки определены на основании уравнения Морисона. Скоростные и инерционные составляющие нагрузки от воздействия волн определены по волновой теории Стокса пятого порядка. В расчете взаимодействие опорных колонн конструкции с грунтом условно моделируется пружинами. Исследовано влияние курсового угла на пространственную конструкцию. Выполнен расчет собственных частот колебаний конструкции. Проведена верификация численных методов расчета.

Ключевые слова: самоподъемная плавучая буровая установка, уравнение Морисона, теория волн Стокса пятого порядка, метод конечных элементов.

SIMULATING NON-LINEAR OSCILLATIONS OF AN ELASTIC SPATIAL STRUCTURE UNDER WAVE ACTION

A.V. Aleksandrov, O.E. Litonov, E.V. Soboleva

The performed work is dealt with evaluating wave-induced loads on a single cylindrical column by ANSYS software package. Wave action on a spatial structure being a jackup rig prototype is examined. Wave-induced loads were determined by means of ANSYS software package based on Morison equation. Velocity and inertia components of wave-induced impacts were estimated according to the fifth-order Stokes wave theory. Support column interaction with the soil was conditionally simulated by springs. The heading angle effects on the spatial structure were investigated. Natural oscillation frequencies of the structure were calculated. Numerical computing methods were verified.

Keywords: jackup rigs, Morison equation, fifth-order Stokes wave theory, finite element analysis.

Введение

В настоящее время ведутся активные разработки в сфере добычи полезных ископаемых на морских месторождениях. При этом потенциал месторождений континентального шельфа России достаточно велик и перспективен. Мировой опыт свидетельствует о том, что решение задач освоения шельфа в научно-техническом плане на порядок сложнее и дороже, чем выполнение подобных задач в обычных материальных условиях. По существу это качественно новые задачи, требующие пересмотра большинства подходов, сформировавшихся к настоящему времени в проектировании, строительстве и эксплуатации сложных инженерно-техниче-

ских сооружений в условиях континентального шельфа. К их числу, прежде всего, относятся самоподъемные плавучие буровые установки (СПБУ). С конструктивной точки зрения это оффшорные установки с водоизмещающим корпусом, которые применяются для бурения скважин на глубине моря от 20 до 120 м. Установка представляет собой плавучий понтон той или иной формы и некоторого числа (не менее трех) опорных колонн. В архитектурно-конструктивном отношении СПБУ различаются по количеству, форме и конструкции опорных колонн, конструктивному оформлению опорного башмака, форме понтона и расположению на нем буровой вышки.

Наиболее распространены конструкции с тремя или четырьмя опорными колоннами, хотя встречаются с шестью и более. По форме опорные колонны бывают цилиндрическими и ферменными.

В основном исследования морских месторождений проводят на больших глубинах, где применяются установки с колоннами ферменного типа. При этом недостаточно внимания уделяется исследованиям на мелководье, на котором преимущественно используются СПБУ с цилиндрическими колоннами, потому в статье рассматривается конструкция именно с этими опорами [1–4].

Целью работы является разработка метода динамического расчета конструкций, учитывающего взаимодействие нерегулярных факторов внешней среды (волн) с колеблющимися пространственными сооружениями.

Определение волновых нагрузок

Расчетный метод основан на использовании программного комплекса *ANSYS* на стадии формирования и определения волновых нагрузок, а не только при оценке реакций на них. Он позволяет учитывать реальную геометрию конструкции, работу опорных оснований с грунтом, нелинейный характер отклика исследуемых конструкций при волновом воздействии, пространственность нагружения с приемлемой для практики точностью.

Для расчета волновых нагрузок в *ANSYS Mechanical* [5] использовался конечный элемент (КЭ) *PIPE288*, с помощью которого моделировалась труба, погруженная в воду. Элемент работает на растяжение-сжатие, кручение

и изгиб, содержит компоненты усилий, которые включают в себя реакции от волнения и течения воды и задаются с помощью одной из волновых теорий:

- волновая теория Эри;
- теория волн малой амплитуды с эмпирической модификацией функции затухания на глубине;
- теория волн Стокса пятого порядка;
- теория волновой функции потока.

Входными расчетными параметрами являются глубина акватории h , плотность воды ρ_v , курсовой угол α , высота H и период T волны, коэффициенты скоростного $C_{ск}$ и инерционного $C_{ин}$ сопротивлений. Масса элемента включает и присоединенную массу воды, которая определяется по формуле [5]:

$$m = \rho_{тр} (C_{ин} - 1) \left(\frac{\pi d^2}{4} \right), \quad (1)$$

где $\rho_{тр}$ – плотность материала трубы; d – диаметр колонны.

Элемент учитывает геометрическую и физическую нелинейности при расчете от приложенных нагрузок.

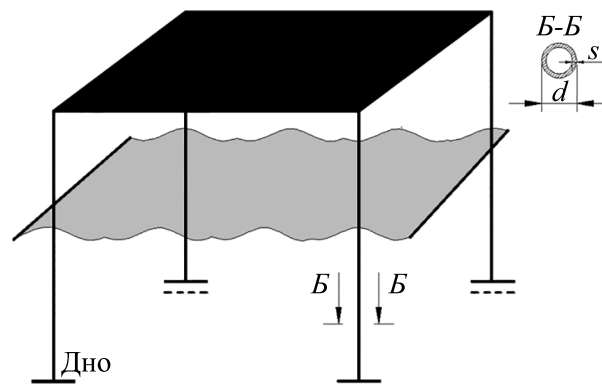
Для определения волнового давления на единицу длины цилиндрической преграды используется уравнение Морисона, которое имеет вид [5]:

$$q = q_{ин} + q_{ск} = \rho_v S C_{ин} a(t, z)_x + \rho_v d C_{ск} \frac{v(t, z)_x |v(t, z)_x|}{2}, \quad (2)$$

где $v(t, z)_x$ и $a(t, z)_x$ – мгновенные значения горизонтальных составляющих скорости и ускорения частиц жидкости, обусловленных



а



б

Рис. 1. Объект исследования:
а – СПБУ; б – идеализированная конструкция

волнением; S – площадь поперечного сечения колонны.

Взаимодействие колонны с грунтом условно моделируется пружиной посредством КЭ COMBIN14 с некоторой податливостью опорного основания A и оценивается коэффициентом опорной пары α [4], который равен отношению изгибающего момента, возникающего при упругой заделке, к изгибающему моменту при жесткой заделке, и определяется по формуле [6]:

$$\alpha = 1(1 + AEI_k/l), \quad (3)$$

$$A = 3(1 - \nu) / 8Gr_0^3, \quad (4)$$

где E , ν – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала колонн, Па; I_k – момент инерции опорной колонны, м⁴; A – податливость основания (коэффициент пропорциональности между опорным моментом и углом поворота опорной поверхности [6]); G – модуль сдвига грунта, МПа; r_0 – радиус основания колонны, м; l – длина колонны, м.

На рисунке 2 приведена схема колонны, где показаны расположение координатных осей, граничные условия и параметры волнения: длина волны λ , высота волны H , глубина акватории h , а также наружный диаметр d и толщина стенки s поперечного сечения колонны.

В качестве примера рассмотрено воздействие волны с параметрами $H = 10,7$ м; $T = 8,73$ с; $\lambda = 115$ м; $h = 23$ м на изолированную цилиндрическую колонну, заделанную в грунте, диаметром $d = 1,22$ м, длиной $l = 33$ м и толщиной стенки $s = 0,05$ м. Коэффициенты $C_{ск}$ и $C_{ин}$ с учетом рекомендаций [6, 7] приняты равными соответственно $C_{ск} = 1$ и $C_{ин} = 2$. Профиль волновой поверхности η , распределение горизонтальных скоростей частиц жидкости v_x по высоте колонны, а также максимальная волновая нагрузка F_{max} и соответствующий ей изгибающий момент M_{max} определены с помощью теории волн Стокса пятого порядка.

Для верификации рассматриваемого метода произведен аналитический расчет волновых нагрузок на одиночно стоящую колонну, заделанную в грунте.

Параметры, описывающие волну (η , $v(t, z)_x$, $a(t, z)_x$), получены с помощью теории волн Стокса пятого порядка [8, 9], согласно которой

$$\eta = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^5 F_n \cos n(kx - \omega t), \quad (5)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (6)$$

$$F_1 = a; F_2 = a^2 F_{22} + a^4 F_{24}; \\ F_3 = a^3 F_{33} + a^5 F_{35}; F_4 = a^4 F_{44}; F_5 = a^5 F_{55}. \quad (7)$$

Здесь параметры формы волны F_{22} , F_{24} , ..., зависящие от величины kH , и параметр высоты волны a связаны между собой соотношением

$$kH = 2[a + a_3 F_{33} + a_5 (F_{35} + F_{55})]. \quad (8)$$

Горизонтальная v_x и вертикальная v_z составляющие скорости частиц жидкости с координатами x , z (начало координат на дне, см. рис. 2) в момент времени t , обусловленные распространением поверхностной волны по акватории глубиной h , могут быть получены из выражений

$$v_x = \frac{\omega}{k} \sum_{n=1}^5 G_n \frac{\text{ch}(nkz)}{\text{sh}(nkh)} \cos n(kx - \omega t), \quad (9)$$

$$v_z = \frac{\omega}{k} \sum_{n=1}^5 G_n \frac{\text{sh}(nkz)}{\text{sh}(nkh)} \cos n(kx - \omega t), \quad (10)$$

$$\text{где } G_1 = aG_{11} + a_3 G_{13} + a_5 G_{15}; \\ G_2 = 2(a^2 G_{22} + a^4 G_{24}); G_3 = 3(a^3 G_{33} + a^5 G_{35}); \\ G_4 = 4a^4 G_{44}; G_5 = 5a^5 G_{55}. \quad (11)$$

Здесь G_{11} , G_{13} , ... – параметры скорости волны, зависящие от kh .

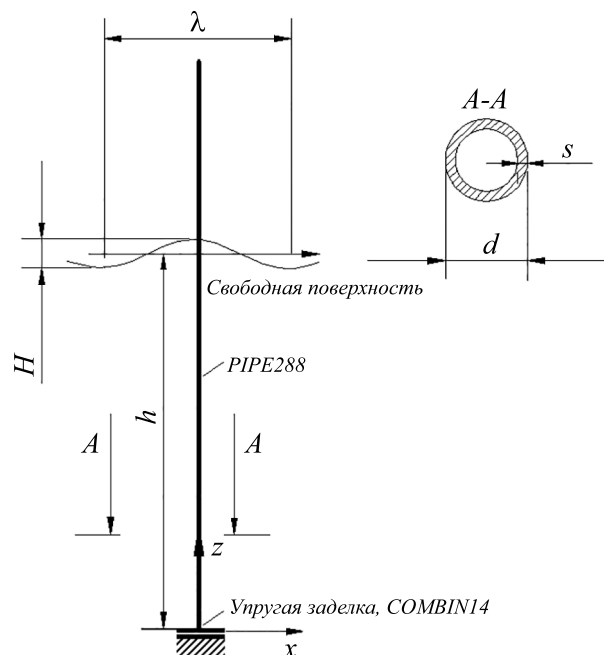


Рис. 2. Схема одиночной колонны

Составляющие ускорений скорости частиц жидкости получены путем дифференцирования выражений (9), (10).

Волновые нагрузки, действующие на колонну, определены по уравнению Морисона (2) [4, 8].

На рисунке 3 приведена эпюра распределения скоростей частиц жидкости по высоте колонны. В таблице 1 приведено сравнение значений горизонтальной составляющей скорости частиц жидкости в момент времени, когда гребень волны проходит через колонну, волновой нагрузки и соответствующего ей изгибающего момента в опорной колонне, полученных аналитическим и численным методами.

Учитывая, что в реальных условиях зачастую наблюдается динамический характер приложения внешних нагрузок, произведен расчет частоты собственных колебаний. Первая ча-

стота свободных колебаний колонны с учетом присоединенной массы воды равна $f = 0,72$ Гц, что в 1,1 раза меньше, чем без учета присоединенной массы.

Также исследовано влияние вида заделки на частоту собственных колебаний. При изменении α от 0 (свободное опирание) до 1 (жесткая заделка) частота свободных колебаний изменяется от 0,25 Гц до 1,1 Гц.

На основе данных табл. 1 можно сделать вывод о пригодности используемой методики для определения волновых нагрузок и отклика системы на данное воздействие.

Расчет пространственной конструкции

Рассматриваемые СПБУ представляют собой пространственные конструкции, поэтому исследовалось натекание волны на сооружение, состоящее из четырех опорных колонн и понтона, в условиях выживания (штормового отстоя) под разными курсовыми углами. Расчетная схема и конечно-элементная модель конструкции показаны на рис. 4 и 5. Для моделирования понтона использован один КЭ оболочечного типа *SHELL181* с бесконечной жесткостью и толщиной 1 м. Параметры конструкции приведены в табл. 2.

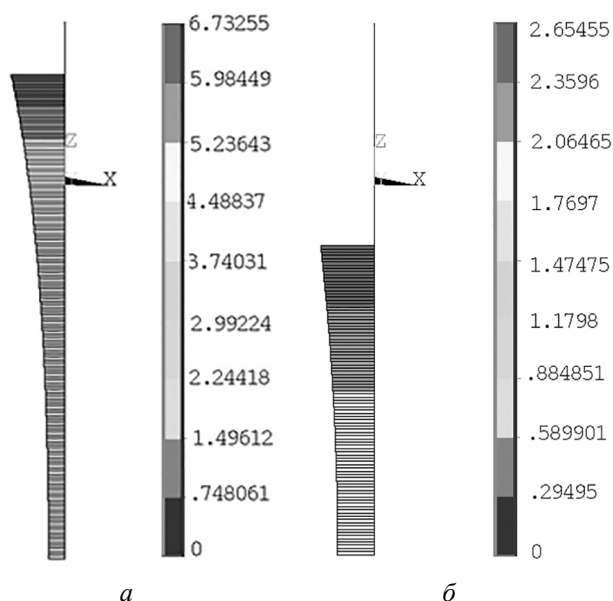


Рис. 3. Эпюра скорости частиц жидкости v_x по глубине:
 а – в момент времени, когда гребень волны проходит через колонну ($t = T$);
 б – в момент времени, когда подошва волны проходит через колонну ($t = T/2$)

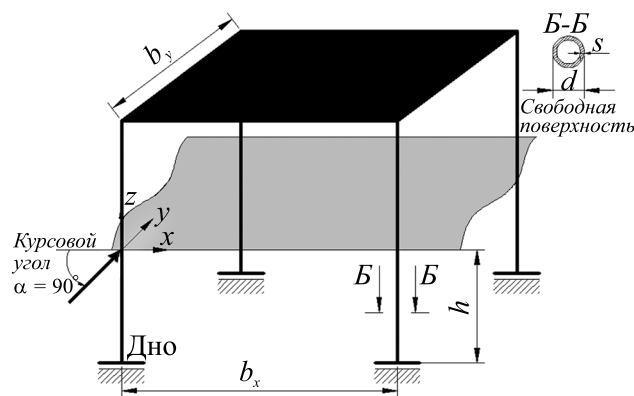


Рис. 4. Расчетная схема конструкции понтона

Таблица 1

Результаты расчетов, полученных аналитическим и численным методами

Расчетные параметры	Аналитический метод	Численный метод	Относительная погрешность, %
$v_{x \max}$, м/с	6,75	6,73	0,30
$F_{\max}$, кН	248,0	254,0	2,8
$M_{\max}$, МН·м	5,23	5,28	3,60

Таблица 2

Параметры конструкции и волнения

Параметры	Значение
Количество опор (колонн)	4
Суммарная расчетная масса понтона M_p , т	7000,0
Диаметр опоры d , м	3,0
Толщина стенки опоры s , м	0,045
Расстояние между опорами по длине понтона b_x , м	46,2
Расстояние между опорами по ширине понтона b_y , м	36,6
Длина опоры l , м	40,6
Коэффициент скоростного сопротивления $C_{ск}$	1,0
Коэффициент инерционного сопротивления $C_{ин}$	2,0
Коэффициент опорной пары α	0,6
Расчетная глубина моря h , м	23,0
Высота волны H , м	16,1
Период волнения T , с	11,0
Длина волны λ , м	165,0

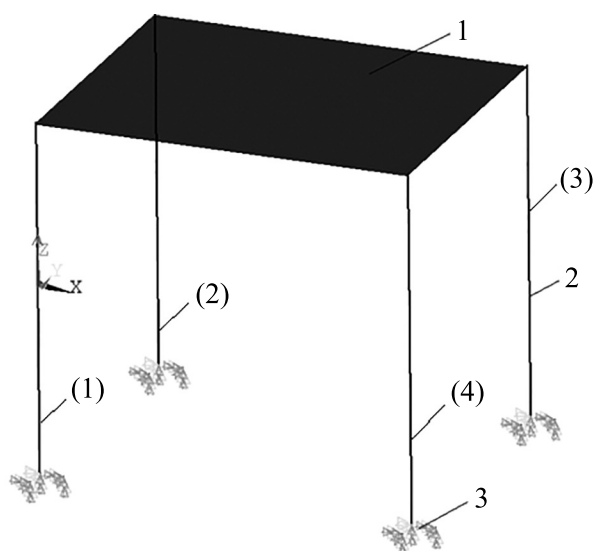


Рис. 5. Конечно-элементная модель конструкции (показаны и граничные условия):

1 – понтон, КЭ SHELL181; 2 – опорные колонны (1-4), КЭ PIPE288; 3 – упругая заделка, моделирующая жесткость грунта, КЭ COMBIN14

В результате расчета, базирующегося на использовании уравнения Морисона, определены волновые нагрузки на конструкцию при курсовых углах ($\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$), получены эпюры осевых и изгибных напряжений, распределение эквивалентных напряжений по сечениям колонн. Максимальные эквивалентные напряжения (по Мизесу) получены при $\alpha = 45^\circ$. На рисунках 6–8 приведены деформированный вид конструкции, эпюры волновых нагрузок и изгибных напряжений, полученных при $\alpha = 45^\circ$ в момент времени $t = T$.

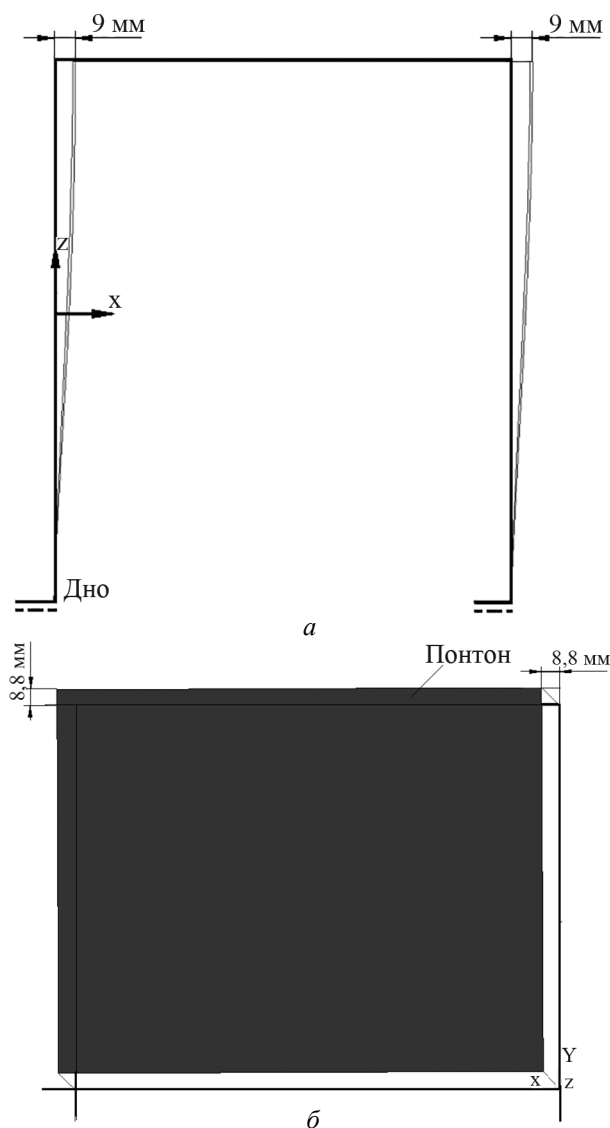


Рис. 6. Деформированный вид конструкции:
а – вид по оси X; б – вид по оси Z
(оси выделены автофигурами)

На рисунке 7 показано, что нагрузки распределены неравномерно на конструкцию: при натекании волны в момент времени $t = T$ максимальная высота волны (вершина) приходится на первую колонну. Соответственно эпюры распределения изгибных напряжений для каждой колонны различны.

Для определения низших собственных частот колебаний конструкции проведен модальный анализ. Первая частота свободных колебаний с учетом присоединенной массы воды равна $f = 0,32$ Гц. На рисунке 9 показана первая форма свободных колебаний конструкции с учетом податливости опоры.

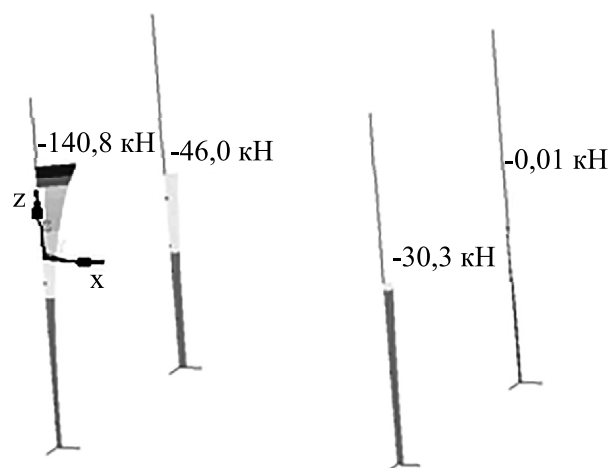


Рис. 7. Эпюра волновых нагрузок на колонны

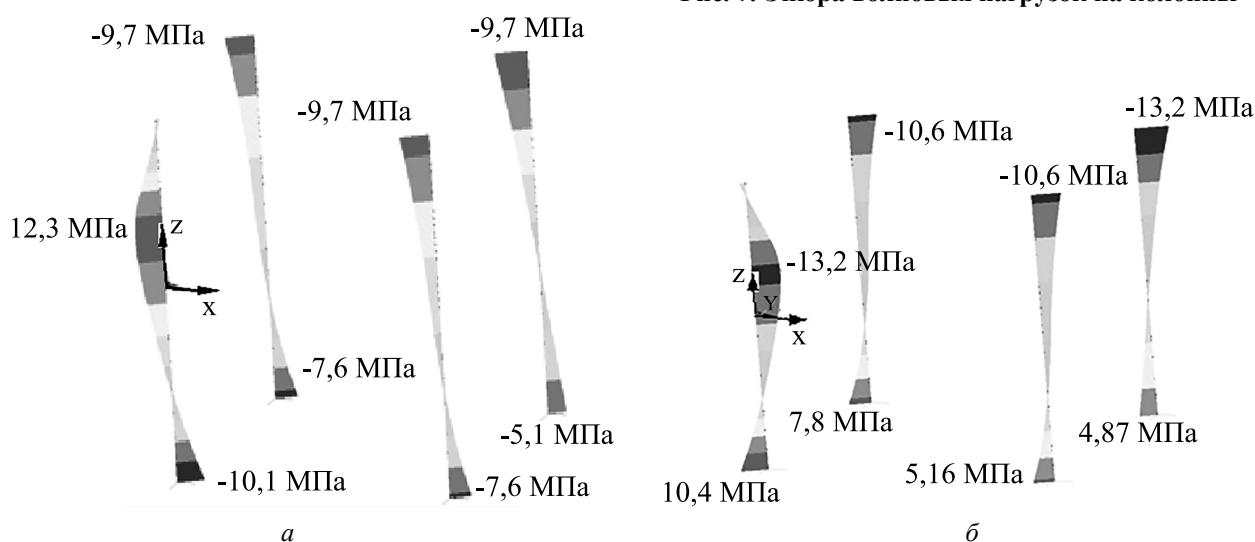


Рис. 8. Эпюры изгибных напряжений по оси Y (а) и по оси Z (б)

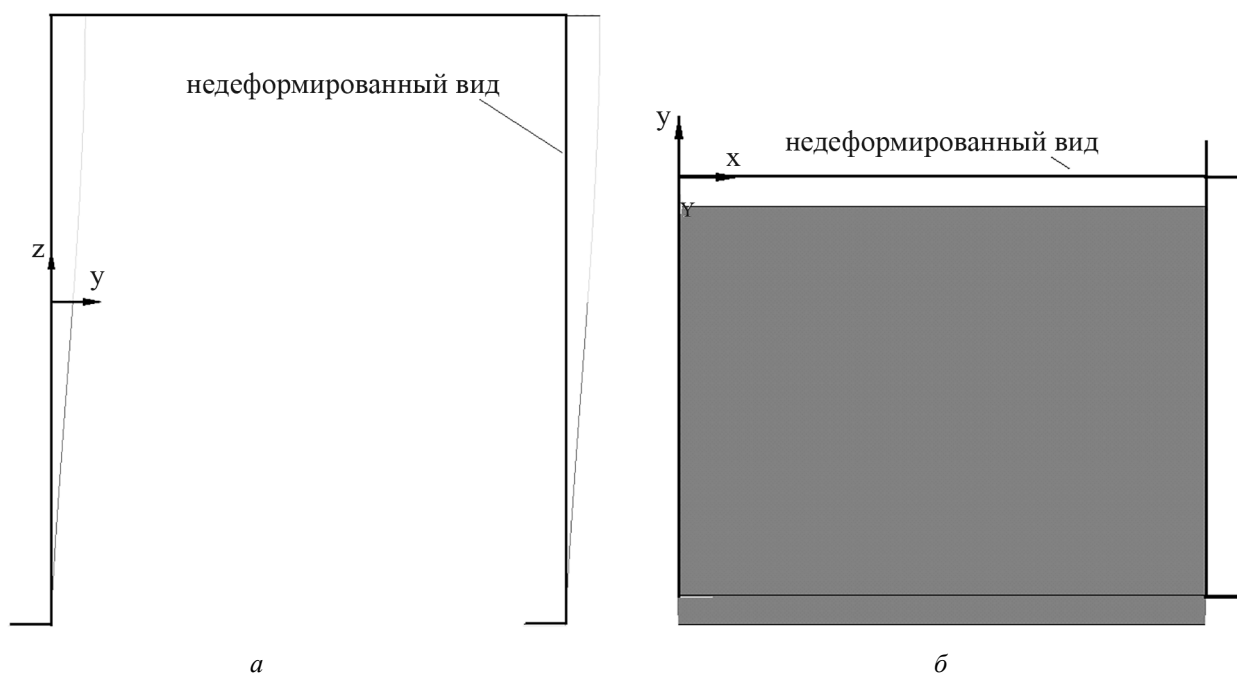


Рис. 9. Первая форма свободных колебаний конструкции по осям X (а) и Z (б)

Анализ результатов расчета показал, что в общем случае при различных волновых режимах отклик системы зависит от нагрузки нелинейно.

Заключение

В ходе проведенного исследования волновых нагрузок на одиночную цилиндрическую колонну получены результаты, согласующиеся с известными аналитическими решениями, что подтверждает возможность использования предложенного метода для решения поставленной задачи как в статическом, так и динамическом вариантах.

Расчет, выполненный представленным методом, показал, что отклик конструкции на регулярное волновое воздействие является нелинейным и зависит от курсового угла α . Наибольшие максимальные напряжения соответствуют $\alpha = 45^\circ$.

Список литературы

1. Симаков Г.В., Смелов В.А., Шхинек К.Н. Морские гидротехнические сооружения на континентальном шельфе: учеб. Л.: Судостроение, 1989. – 328 с.
2. Самоподъемные плавучие буровые установки: история, современность, перспективы. Аналитический обзор / СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2013 г. – 206 с.
3. Морские буровые установки. – URL: <http://www.rig-s.ru/> (дата обращения: 27.12.2015).
4. Литонов О.Е. Решение принципиальных вопросов прочности, надежности и металлоемкости конструкций самоподъемных плавучих буровых установок: дисс. док. тех. наук. Л.: ЦНИИ им. Акад. А.Н. Крылова, 1983. – 453 с.
5. ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. ANSYS Release 14.5 ANSYS Inc., 2012. – 1192 p.
6. Российский морской регистр судоходства. «Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ», 2012. – 479 с.
7. Бреббия К., Уокер С. Динамика морских сооружений. Л.: Судостроение, 1983. – 230 с.
8. Доусон Т. Проектирование сооружений морского шельфа. Л.: Судостроение, 1986. – 286 с.
9. Skjelbrevia L., Hendrickson A. Fifth order gravity wave theory // Proc. VII Conference on Coastal Engineering. 1961. P. 184–196.

Материал поступил в редакцию 25.06.2015

АЛЕКСАНДРОВ Анатолий Владимирович

E-mail: krylov@krylov.spb.ru
Тел.: (812) 415-45-73

Кандидат технических наук, начальник 31 лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Сфера научных интересов – строительная механика, информационные технологии, МКЭ. Автор более 30 статей.

ЛИТОНОВ Олег Евгеньевич

Доктор технических наук, главный научный сотрудник 31 лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Сфера научных интересов – теория вероятностей, статистика, самоподъемные плавучие буровые установки, усталостная прочность конструкций морских сооружений, надежность ледостойких платформ. Автор 3 монографий, около 100 статей.

СОБОЛЕВА Елена Владимировна

E-mail: sobolewa.elena@gmail.com
Тел.: (812) 415-48-21

Инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Сфера научных интересов – строительная механика, МКЭ, самоподъемные плавучие буровые установки.