

УДК 532.6

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ПЛАТФОРМЫ С НАТЯЖНЫМИ ОПОРАМИ ТИПА “МОРСКАЯ ЗВЕЗДА” НА РЕГУЛЯРНЫХ ВОЛНАХ

М. М. Абаи, М. Ж. Кетабдари, А. Ахмади, Х. Алеми Ардакани

Технологический университет им. Амир-Кабера, Тегеран, Иран

E-mails: mahdy.abaiee@aut.ac.ir, ketabdard@aut.ac.ir, Ali_Ahmadi@alum.sharif.ir,

h.alemiardakani@surrey.ac.uk

Проведено экспериментальное исследование поведения миниатюрной модели платформы с натяжными опорами типа “морская звезда” (масштаб 1 : 100) в волновом лотке. С использованием метода конечных элементов, основанного на уравнении Моррисона, и метода граничных элементов, основанного на трехмерной теории дифракции и излучения, выполнены численные расчеты гидродинамических сил. С помощью модифицированного метода Эйлера интегрируется нелинейное уравнение связанного движения корпуса и натяжных элементов для мини-платформы с натяжными опорами типа “морская звезда”. Проведено сравнение результатов численного моделирования поведения платформы при различных степенях свободы с экспериментальными данными. Показано, что эти результаты хорошо согласуются. Установлено, что при проведении гидродинамического анализа поведения платформы типа “морская звезда” достаточно использовать дифракционный метод первого порядка и выполнить квазистатическое моделирование натяжных элементов.

Ключевые слова: платформа с натяжными опорами типа “морская звезда”, модельное исследование, метод граничных элементов, модифицированный метод Эйлера, дифракция, излучение.

DOI: 10.15372/PMTF20160315

Введение. Добыча нефти и использование энергии волн на большой глубине требуют применения специальных плавучих платформ. Однако по мере увеличения глубины погружения окружающая среда становится более неблагоприятной, что обуславливает необходимость использования высокотехнологичных конструкций. При этом требуется свести к минимуму сопротивление конструкции внешним нагрузкам за счет использования “гибких” сооружений. Вследствие гибкости конструкции возникают большие деформации, в силу чего матрица жесткости конструкции является нелинейной. Среди “гибких” сооружений платформы с натяжными опорами (tension leg platform (TLP)) являются более востребованными, поскольку имеют большую жесткость при вертикальной, килевой и бортовой качке. Так как силы плавучести превышают силу тяжести платформы, опоры всегда находятся в состоянии растяжения. Как правило, платформы с натяжными опорами бывают двух типов: обычные и “морская звезда”. Платформа типа “морская звезда”

представляет собой вертикальный круговой цилиндр, установленный на трех сужающихся в радиальном направлении трапециевидных понтонах, соединенных с дном упругими связями. Поскольку платформы типа “морская звезда” имеют меньшую площадь соприкосновения с поверхностью воды по сравнению с обычными платформами, они испытывают меньшие нагрузки. Жесткость натяжных элементов в осевом направлении уменьшает период свободных вертикальных колебаний. Конструкция платформы типа “морская звезда” обеспечивает максимальную грузоподъемность при заданном весе корпуса, что позволяет выдерживать вес, в 1,8 раза превышающий собственный вес платформы. Иными словами, платформа типа “морская звезда” является более экономичной по сравнению с другими типами плавучих платформ. Кроме того, натяжные элементы на концах понтонов обеспечивают устойчивость платформы при килевой качке и рыскании [1]. Преимущество платформ типа “морская звезда” по сравнению с другими платформами возрастает по мере увеличения размера корпуса [2]. В этом случае для оптимального проектирования и управления конструкцией необходимо иметь точные и надежные характеристики реакции на возмущение. В работах [3–5] предложена концепция модифицированной платформы типа “морская звезда”, имеющей простую геометрию и основание в виде вертикального цилиндра, соединенного с тремя радиально сужающимися трапециевидными понтонами. Горизонтальные понтоны позволяют уменьшить амплитуду колебаний при вертикальной качке.

В работе [6] проведен численный анализ поведения платформы типа “морская звезда”, платформ с башенным основанием и конструкций с плавучими опорами. В [7] показаны преимущества использования ТЛР типа “морская звезда”, установленной в районе истощенного месторождения Морпет в Мексиканском заливе на глубине 510 м. В работах [1, 8] исследована динамика связанного движения мини-ТЛР типа “морская звезда”. Изучено движение платформы при вертикальной, килевой и продольно-горизонтальной качке при наличии монохроматической волны высотой 2 м и нулевом угле атаки. В [2, 9] экспериментально изучено поведение мини-ТЛР типа “морская звезда” (масштаб 1 : 100) в волновом лотке при наличии регулярных и нерегулярных волн. Исследованы изменения поведения платформы во времени и амплитуды колебаний. В [10–12] численно и аналитически изучены динамические характеристики ТЛР с учетом нелинейного поведения конструкции и возбуждающих сил.

Целью данной работы является численный анализ поведения мини-ТЛР типа “морская звезда” на линейных волнах. Для расчета сил и гидродинамических коэффициентов разработана программа численного решения с использованием метода граничных элементов, основанного на трехмерной теории дифракции и излучения.

1. Исследование связанного движения с использованием метода граничных элементов. Уравнение движения треугольной ТЛР, соединенной с натяжными элементами, под действием регулярных волн записывается в виде

$$[M + M_a]\{\ddot{X}\} + [C_H + C_S]\{\dot{X}\} + [k_l]\{X\} + [k_n(X)]\{X^3\} = \{F(t)\}, \quad (1)$$

где $[M + M_a]$, $[C_H + C_S]$ — матрицы массы и присоединенной массы, гидродинамического и структурного демпфирования; $[k_l]$, $[k_n]$ — линейная и нелинейная матрицы жесткости; $\{X\}$, $\{\dot{X}\}$, $\{\ddot{X}\}$ — векторы смещения конструкции, скорости и ускорения соответственно; $\{F(t)\}$ — вектор возмущающей силы. В рамках трехмерной теории дифракции и излучения возмущающая сила представляется в виде

$$F(t) = F_I + F_D,$$

где F_I — сила Фруда — Крылова; F_D — дифракционная сила, обусловленная наличием рассеянной падающей волны. Присоединенная масса и гидродинамическое демпфирование являются силами инерции, обусловленными излучением конструкции.

Для вычисления сил на основе модели несжимаемого и безвихревого течения предполагается, что потенциал скорости является линейной суперпозицией потенциала набегающих волн, дифракционного потенциала и потенциала поля излучения:

$$\Phi = (\Phi_I + \Phi_D + \Phi_R) e^{i\omega t}.$$

Потенциал поля излучения Φ_R состоит из шести компонент, характеризующих движение в шести направлениях (Φ_j , $j = 1, 2, \dots$ — потенциалы, обусловленные движением в j -м направлении элементарного объема тела, плавающего в невозмущенной жидкости). В результате граничные условия имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_j}{\partial n} = i\omega n_j, \quad j = 1, 2, 3, \quad \frac{\partial \Phi_j}{\partial n} = i\omega(\mathbf{r} \times \mathbf{n}), \quad j = 4, 5, 6, \\ \mathbf{r} = (x, y, z), \quad \mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z). \end{aligned} \quad (2)$$

Рассеяние возникающей волны — это сумма потенциала набегающих волн Φ_I и дифракционного потенциала Φ_D . В задаче дифракции граничные условия на поверхности тела формулируются в виде равенства нулю производной по нормали к поверхности тела от суммы этих двух потенциалов:

$$\frac{\partial (\Phi_I + \Phi_D)}{\partial n} = 0 \quad \text{на} \quad S_B. \quad (3)$$

Потенциалы Φ_D и Φ_R могут быть вычислены с помощью метода конечных элементов. Граничное интегральное уравнение для мини-TLP типа “морская звезда” имеет вид

$$\frac{1}{2} \Phi(P) + \int_{S_B} \Phi(q) \frac{\partial G(P, q)}{\partial n} ds = \int_{S_B} G(P, q) \frac{\Phi(P, q)}{\partial n} ds,$$

где $P = (x_t, y_t, z_t)$ — точка, в которой расположен источник возбуждения; $q = (x_j, y_j, z_j)$ — точка, в которой находится наблюдатель; $G(P, q)$ — трехмерная функция Грина, соответствующая бесконечной глубине и удовлетворяющая условиям на свободной поверхности и условиям излучения в дальней области [13]. При вычислении потенциалов поля излучения и дифракции определение функции Грина является сложной задачей. В [14] предложен эффективный метод, обычно используемый для оценки функции Грина. В данной работе этот метод использовался при определении эффективных матриц. При этом предполагалось, что величина потенциала постоянна в каждом элементе, граничные условия для нормальной скорости в (2), (3) выполняются в центре масс каждого прямоугольного элемента. Таким образом, эффективные матрицы H и G могут быть определены в следующем виде:

$$H_{ij} = \iint_{s_i} \frac{\partial G(x_i, y_i, z_i; x_j, y_j, z_j)}{\partial n} ds, \quad G_{ij} = \iint_{s_i} G(x_i, y_i, z_i; x_j, y_j, z_j) ds. \quad (4)$$

Для расчета силы дифракции и силы излучения уравнение (4) необходимо решить сначала с граничными условиями (2), а затем — с граничными условиями (3). С учетом линейного уравнения Бернулли гидродинамическое давление и силы вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} p = -\rho \left(\frac{\partial \Phi_I}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_D}{\partial t} \right) - \rho \left(\frac{\partial \Phi_R}{\partial t} \right) - \rho(gz), \\ F(t) = F_I + F_D = - \iint_{S_B} \rho \left(\frac{\partial \Phi_I}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_D}{\partial t} \right) \mathbf{n} ds, \end{aligned}$$

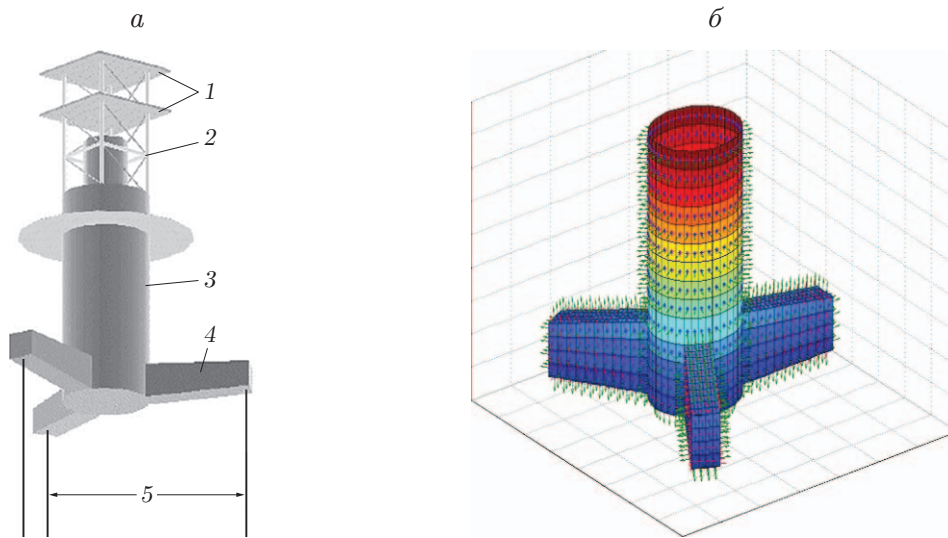


Рис. 1. Конструкция платформы типа “морская звезда” [1] (а) и расчетная сетка (б):

1 — палубы, 2 — башня, 3 — цилиндр, 4 — понтоны, 5 — опоры

$$F_R = - \iint_{S_B} \rho \left(\frac{\partial \Phi_R}{\partial t} \right) \mathbf{n} ds = -m_{ij} \dot{U}_j - c_{ij} U_j,$$

где m_{ij} , c_{ij} — массивы гидродинамической присоединенной массы и демпфирующих матриц. При выполнении гидродинамического анализа платформа была разделена на 1561 панель одного и того же размера. На рис. 1 показаны конфигурация платформы типа “морская звезда” и расчетная сетка.

2. Матрица жесткости натяжных элементов платформы типа “морская звезда”. Поскольку жесткость натяжных элементов существенно влияет на поведение ТЛР, необходимо получить ее более точную оценку. Основное воздействие на поведение натяжных элементов оказывают пространственные и материальные характеристики, а также механические свойства натяжных элементов. При определении жесткости натяжных элементов использовались следующие предположения:

1. Натяжной элемент диаметром D и длиной L , изготовленный из однородного материала с модулем упругости E , является цилиндрическим с постоянным поперечным сечением.

2. Материал натяжного элемента является линейно-упругим.

3. Нижнее основание платформы жесткое недеформируемое, в то время как натяжные элементы могут деформироваться.

4. Между основанием платформы и натяжными элементами имеется соединение шарнирного типа.

5. Поскольку углы наклона корпуса очень малы, $\sin \alpha \sim \alpha$.

Массивы матрицы жесткости могут быть вычислены аналитически с использованием линейного уравнения $F_i = K_{ij} X_j$ с учетом шести степеней свободы (K_{ij} — массив матрицы жесткости, определяемый как единичная деформация тела в j -м направлении и позволяющий вычислить силу в i -м направлении).

Иными словами, матрица жесткости определена в квазистатическом состоянии и существенно зависит от геометрии плавающего тела. В случае продольно-горизонтальной и вертикальной качки платформы коэффициент жесткости рассчитывается следующим

образом:

$$\begin{aligned} k_{11}x &= n(T_0 + \Delta T) \sin \theta = n\left(T_0 + \frac{(\sqrt{x^2 + L^2} - L)AE}{L}\right) \sin \theta = \\ &= n\left(T_0 + \frac{(x^2)AE}{(\sqrt{x^2 + L^2} + L)L}\right) \sin \theta = n\left(\frac{T_0x}{L} + \frac{AE}{2L^3}x^3\right) = k_1^m x + k_2^m x^3, \\ k_{33}z &= n\frac{AE}{L}z + \frac{\rho g \pi D^2}{4}z = k_3^m z + k_3^b z. \end{aligned}$$

Здесь L — начальная длина натяжного элемента; A — площадь поперечного сечения натяжного элемента; T_0 — предварительное напряжение натяжного элемента; ΔT — добавочное напряжение натяжного элемента; θ — угол между касательной к изогнутому натяжному элементу и вертикалью ($\sin \theta \approx \theta = x/L$); k_1^m, k_2^m — линейная и нелинейная жесткости натяжного элемента при продольно-горизонтальной качке соответственно; k_2^m, k_2^b — линейная жесткость натяжного элемента и жесткость плавучести мини-ТЛР типа “морская звезда” соответственно; n — общее число натяжных элементов. Такой же анализ может быть выполнен для других степеней свободы. Матрица жесткости платформы определяется следующим образом:

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & 0 & 0 & k_{36} \\ 0 & k_{42} & 0 & k_{44} & 0 & 0 \\ k_{51} & 0 & 0 & 0 & k_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{66} \end{bmatrix}.$$

Полагая, что структурная матрица демпфирования $[C_S]$ пропорциональна общей массе и жесткости платформы, можно определить ее с использованием ортогональных свойств матриц $[M], [K]$:

$$C_S = \alpha M + \beta K.$$

3. Интегрирование уравнения движения по времени. При интегрировании уравнений движения по времени использовался модифицированный метод Эйлера (ММЭ). Поскольку метод Эйлера может быть неустойчивым и приводить к большим ошибкам, при использовании ММЭ необходим анализ устойчивости. Этот метод применяется при анализе динамики структур первого порядка.

Дискретный аналог динамического уравнения (1), построенный с использованием ММЭ, имеет вид

$$\begin{aligned} ([M] + [M_a])\{\ddot{x}_n\} + [C_H + C_S]\{\dot{x}_n\} + [k_L]\{x_n\} + [k_n(X)]\{x_n^3\} &= \{F(t)\}, \quad t = n \Delta t, \\ \{\ddot{x}_n\} &= ([M] + [M_a])^{-1}(\{\dot{x}_n\} - [C_H + C_S]\{\dot{x}_n\} - [k_L]\{x_n\} - [k_n(X)]\{x_n^3\}), \\ \{\dot{x}_{n+1}\} &= \{\dot{x}_n\} + \Delta t\{\ddot{x}_n\}, \quad \{x_{n+1}\} = \{x_n\} + \frac{\Delta t}{2}(\{\dot{x}_n\} + \{\dot{x}_{n+1}\}). \end{aligned}$$

Проверка устойчивости для данной задачи показывает, что ММЭ устойчив при $\Delta t < 0,0032$. Так как в начальном состоянии модель платформы находилась в покоящейся воде, в начальный момент времени смещения и скорости полагались равными нулю.

При исследовании высоких частот колебаний конструкции необходимо использовать другие методы, например метод Неймарка [15].

Поскольку в данной работе использовалась теория дифракции и излучения, при моделировании гидродинамических нагрузок на корпус ТЛР применялось правило масштабирования Фруда. Влияние вязкости в гидродинамическом уравнении не учитывалось.

4. Экспериментальная модель и критерий подобия. Для того чтобы модель достаточно точно описывала поведение реальной платформы типа “морская звезда”, необходимо учитывать глубину воды, особенно в случае, когда коэффициент масштабирования равен $1/100$. Чтобы экстраполировать результаты эксперимента для модели на поведение реальной конструкции на глубине 1000 м, требуется лоток глубиной 10 м (масштаб 1 : 100). Такое глубокое водохранилище, как правило, недоступно. Тем не менее численная модель должна быть подтверждена модельными испытаниями.

Эксперименты проводились для модели ТЛР типа “морская звезда” в лабораторном гидролотке при наличии монохроматических волн [9]. Аналогичные эксперименты описаны в работе [1]. При динамическом моделировании основной задачей является воспроизведение действующих сил. В первую очередь необходимо учитывать те силы, которые оказывают наиболее существенное влияние на поведение конструкции. Основным принцип используемых законов масштабирования заключается в том, что силы инерции и гравитации можно масштабировать одновременно, а вязкие силы и давления — нельзя. При моделировании процессов, происходящих при наличии свободной поверхности, число Фруда можно использовать в качестве параметра релаксации, если силы подобны, поскольку оно позволяет оценить силу инерции, действующую на частицу жидкости. В большинстве случаев силы инерции, воздействующие на морские сооружения, преобладают над вязкими силами, так как размеры этих сооружений больше размеров падающих волн. Поэтому в данной работе правило масштабирования Рейнольдса не использовалось.

В задачах взаимодействия жидкости и конструкции упругие силы можно моделировать одновременно с силами инерции и гравитации, что предполагает совпадение чисел Фруда и Коши в модели и реальной конструкции. Тем не менее вследствие отсутствия материала, необходимого для построения модели, часто используется масштабирование, при котором числа Коши в модели и реальной конструкции различаются. В силу ограничений, налагаемых на вертикальный размер гидролотка, с учетом того, что значения упругих характеристик натяжных элементов больше веса этих элементов, использовалась видоизмененная модель тросов на основе подобия Коши. Иными словами, сила упругости натяжного элемента объединялась с силами инерции конструкции.

Если λ — коэффициент масштабирования, то в геометрически подобной модели жесткость вертикальных колебаний масштабируется с коэффициентом λ^2 . Отношение жесткости тросов к жесткости вертикальных колебаний в модели и реальной конструкции должно быть одним и тем же. Аналогично, если вес корпуса масштабируется с коэффициентом λ^3 , то вес тросов должен масштабироваться с тем же коэффициентом λ^3 . Полагая, что площадь поперечного сечения оголенного натяжного элемента равна A , вес на единицу длины можно масштабировать с коэффициентом λ^2 :

$$(EA/L)_p = (EA/L)_m = \lambda^2, \quad \frac{(\rho_t A)_p}{(\rho_t A)_m} = \lambda^2.$$

Здесь ρ_t — плотность материала троса. В эксперименте модель платформы типа “морская звезда” была реализована в масштабе 1 : 100. Для модели такой платформы было выбрано отношение веса к предварительному натяжению $W/T = 3,03$, что является типичным для ТЛР.

Эксперименты проводились в лотке шириной 2,5 м, длиной 33 м и глубиной 0,72 м. Более подробные сведения об эксперименте приведены в работе [9].

5. Анализ результатов численных расчетов и экспериментальных данных. В работе [9] численно и экспериментально изучено поведение ТЛР типа “морская звезда”

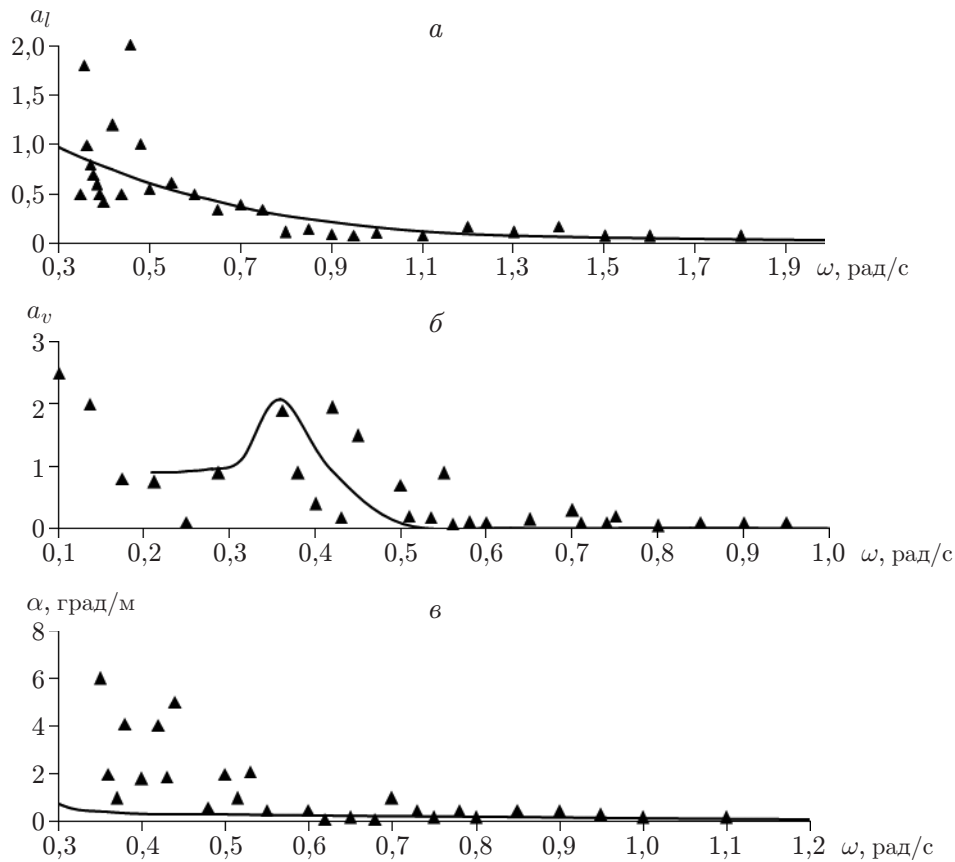


Рис. 2. Зависимости амплитуд килевых a_l (а) и вертикальных a_v (б) колебаний и угла наклона конструкции (в) от частоты колебаний ω : точки — результаты экспериментов [9], линии — результаты численных расчетов, полученные в данной работе

при воздействии волн, а также приведены результаты анализа частотных характеристик и поведения конструкции во времени. Результаты аналогичных экспериментов приведены в [1]. В данной работе исследовано амплитудное уравнение в широком диапазоне частот при воздействии регулярных волн и проведено сравнение полученных результатов с данными [9] (рис. 2). На рис. 2 представлены результаты численных расчетов без учета жесткости натяжных элементов. Результаты экспериментов показывают, что для натяжных элементов условие подобия Коши не выполняется. Несмотря на то что результаты решения амплитудного уравнения являются удовлетворительными, результаты экстраполяции экспериментальных данных на поведение реальной конструкции могут оказаться недостоверными. Причина этого может заключаться в том, что жесткости натяжных элементов неправильно масштабируются.

В таблице приведены результаты сравнения собственных периодов колебаний модели, полученных в экспериментах [9] и в численном расчете.

На рис. 3 представлены результаты численных расчетов, полученные в настоящей работе, а также результаты численных расчетов и экспериментальные данные работы [1]. В настоящей работе использовался численный метод, основанный на теории дифракции и излучения, корпус платформы полагался твердым, жесткость натяжных элементов определялась на основе закона Гука, система платформа — тросы представляла собой перевернутый маятник, моды упругих колебаний натяжных элементов не учитывались, эффектами

Собственный период T_n при различных видах качки

Тип колебаний	Результаты численного расчета	Результаты экспериментов [9]
Продольно-горизонтальная качка	88,0	—
Вертикальная качка	0,7	16
Бортовая качка	1,1	23
Килевая качка	0,8	23
Рыскание	67,0	—

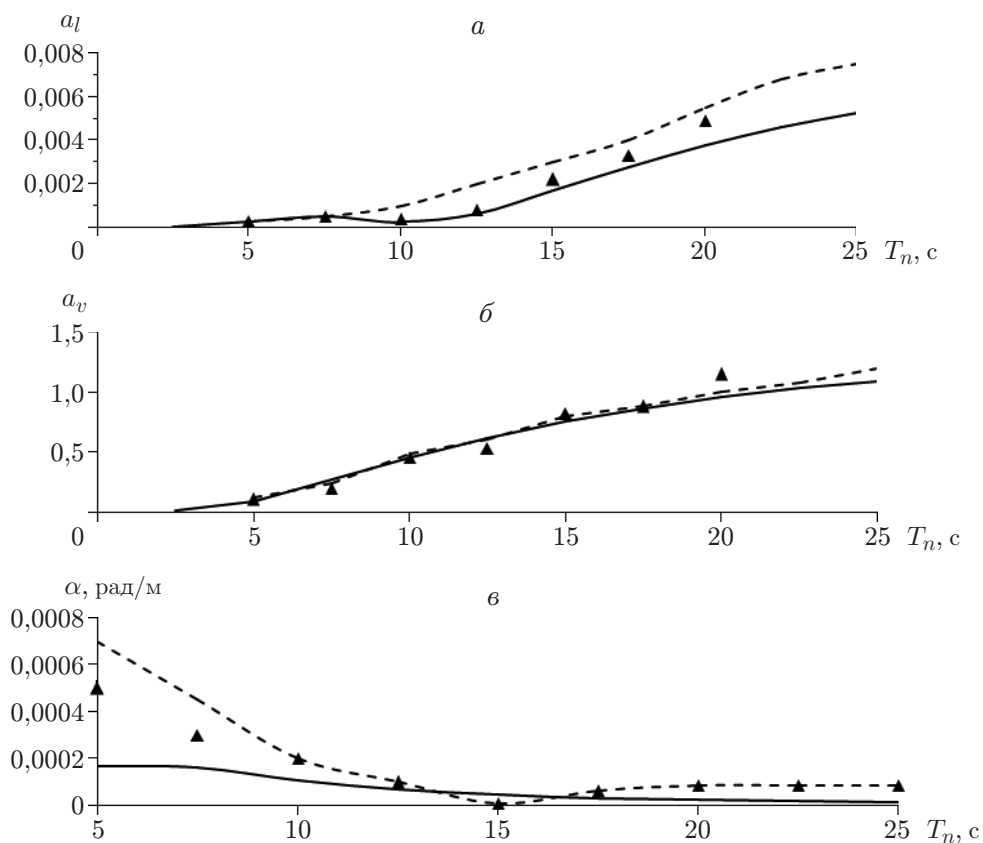


Рис. 3. Зависимости амплитуд килевых a_l (а) и вертикальных a_v (б) колебаний и угла наклона конструкции (в) от периода колебаний T_n : сплошные линии — результаты численных расчетов, полученные в данной работе, штриховые — результаты численных расчетов [1], точки — результаты экспериментов [1]

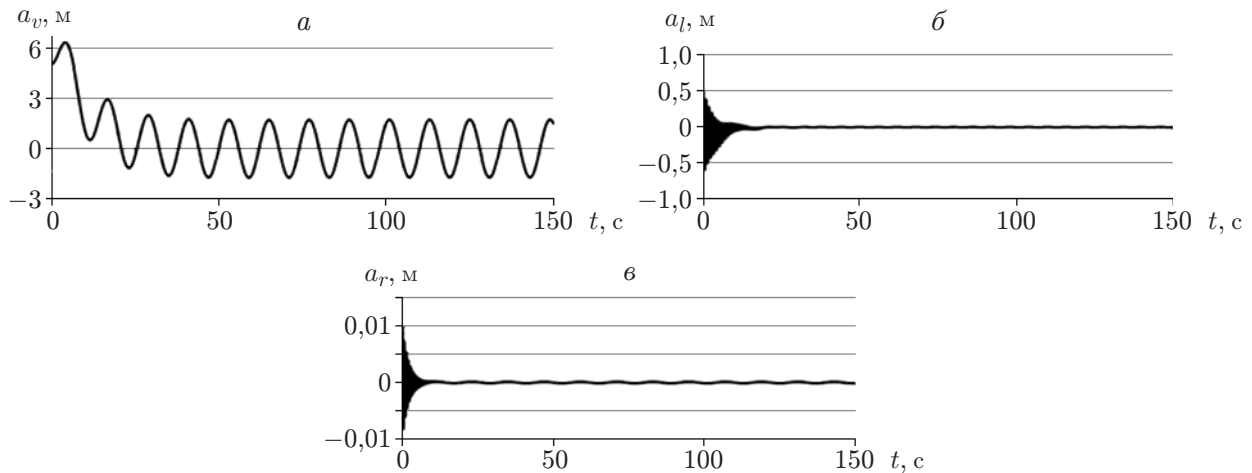


Рис. 4. Зависимости амплитуды колебаний платформы типа “морская звезда” от времени при килевой (а), вертикальной (б) и бортовой (в) качке ($H = 6$ м, $T_n = 12$ с, $\theta = 30^\circ$)

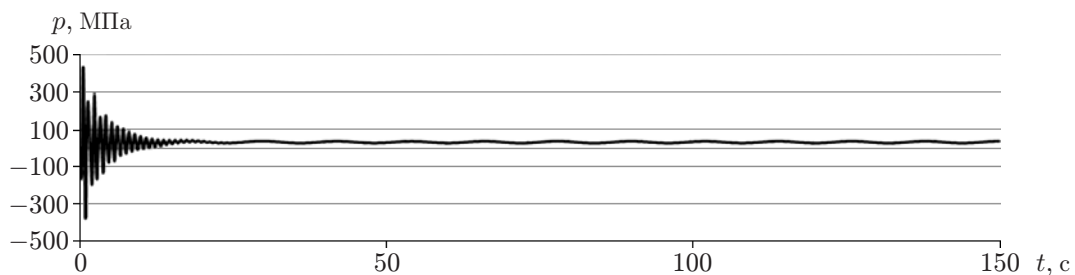


Рис. 5. Зависимость напряжения в натяжном элементе от времени ($H = 6$ м, $T_n = 12$ с, $\theta = 30^\circ$)

второго порядка пренебрегалось. В работе [1] результаты расчетов получены с помощью метода конечных элементов, корпус платформы полагался упругим, жесткость натяжных элементов определялась с использованием стержневого или балочного элемента, система платформа — тросы полагалась связанной, учитывались моды упругих колебаний натяжных элементов.

На рис. 4 приведены зависимости амплитуды колебаний от времени при килевой, вертикальной и бортовой качке. На рис. 5 представлена зависимость напряжения в натяжном элементе мини-платформы типа “морская звезда” от времени при вертикальной качке.

6. Выводы. С использованием метода конечных элементов и метода граничных элементов разработаны численные модели поведения TLP-платформы типа “морская звезда” при воздействии на них волн. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными [9], а также с экспериментальными данными и результатами численных расчетов [1]. Показано, что результаты численных расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными в широком диапазоне периодов колебаний. Таким образом, для проведения гидродинамического анализа TLP достаточно использовать метод дифракции первого порядка и выполнить квазистатическое моделирование натяжных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bhattacharyya S. K., Streekumar S., Idichandy V. G.** Coupled dynamics of sea-star mini TLP // Ocean Engng. 2003. V. 30. P. 709–737.
2. **Ardakani H. A., Ketabdari M. J.** Experimental study on the response behavior of sea-star mini tension leg platform against random water waves // Proc. of the 26th Intern. conf. on offshore mechanics and arctic engineering (OMAE2007), San Diego (USA), June 10–15, 2007. S. l.: ASME, 2007.
3. **Kibbee S., Chianis J., Davies K. B., Sarwono B. A.** The tension leg platform // Proc. of the Offshore technology conf., Houston (USA), 2–5 May 1994. S. l., 1994. P. 243–256.
4. **Kibbee S., Chianis J., Davies K., Sarwono B.** A mini platform for deep water, the sea-star TLP // Proc. of the Soc. of naval architect and marine engineers conf. (SNAME), Tokyo (Japan), Sept. 24–29, 1995. S. l., 1995.
5. **Kibbee S. E., Leverette S. J., Davies K. B., Matten R. B.** Morpeth sea-star mini-TLP // Proc. of the Offshore technol. conf., Houston (USA), 3–6 May 1999. S. l., 1999.
6. **Capanoglu C.** Comparative assessment of new generation deep water marginal field structures // Proc. of the 16th Intern. conf. on offshore mechanics and arctic engineering (OMAE1997), Yokohama (Japan), Apr. 13–17, 1997. S. l., 1997.
7. **Cottrill A.** Monocolumn TLP helps morpeth fly // Offshore Engineer. 1998. July. P. 20–23.
8. **Bhattacharyya S. K., Streekumar S., Idichandy V. G.** Coupled dynamics of seastar mini tension leg platform // Ocean Engng. 2003. V. 30. P. 709–737.
9. **Ketabdari M. J., Ardakani H. A., Ardakani M. A.** Laboratory investigation on response behaviour of seastar mini tension leg platform against regular water waves // Proc. of the 26th Intern. conf. on offshore mechanics and arctic engineering (OMAE2007), San Diego (USA), June 10–15, 2007. S. l.: ASME, 2007.
10. **Tabeshpour M. R., Golafshani A. A., Seif M. S.** Comprehensive study on the results of tension leg platform responses in random sea // J. Zhejiang Univ. 2006. V. 7. P. 1305–1317.
11. **Tabeshpour M. R., Golafshani A. A., Ataie Ashtiani B., Seif M. S.** Analytical solution of heave vibration of tension leg platform // J. Hydrology Hydromech. 2006. V. 54, N 3. P. 280–289.
12. **Tabeshpour M. R., Shoghi R.** Time domain analysis of TLP under linear wave via linearized perturbation technique // Proc. of the 13th conf. of marine industry (IRANAME), Kish (Iran), 7–10 Nov. 2011. S. l., 2011.
13. **Wehausen J. V.** Surface waves / J. V. Wehausen, E. V. Laitone. N. Y.: Springer-Verlag, 1960.
14. **Telste J. G., Noblesse F.** Numerical evaluation of the green function of water-wave radiation and diffraction // J. Ship Res. 1986. V. 30, N 2. P. 69–84.
15. **Hahn G. D.** A modified Euler method for dynamic analysis // Intern. J. Numer. Methods Engng. 1990. V. 32. P. 943–955.

Поступила в редакцию 12/V 2014 г.