

## STRESS-DEFORMED CONDITION OF THE MARINE DRILLING PLATFORM ON THE SHELF OF THE CASPIAN SEA

**T. T. Sultanov, G. M. Tlepiyeva**

Eurasian National University named after LN Gumilev,  
Astana, Republic of Kazakhstan

*Modern spatial structures in the process of work are subject to various force effects, therefore, their structural elements are in a complex stress-strain state, and individual nodes go into the plastic deformation stage, which has a significant impact on the accuracy of calculations. Definition of kinematic and power factors in each node element structures depending on the mechanical and geometrical characteristics of the materials and the quantities and types of external forces, for the purpose of optimal parameters destination constructions is problematic task of structural mechanics and elasticity. The dimensional structures under consideration are divided into final elements that interact with each other at the nodes. All nodes are numbered with indication of the beginning and end of each final element. The design refers to the global coordinate system OXYZ, where the global coordinate system coincides with the coordinate system of the ground solid. A small-layered base with rigidly coupled inclined layers near the structure is modeled by an elastic anisotropic body with an isotropic plane inclined to the horizon at an arbitrary angle and coinciding with the bedding plane of the layers. The equations of the generalized Hooke's law with respect to the Cartesian coordinate system OXYZ are derived, the OZ-axis is directed vertically upward, the axes OX and OY-horizontally. Defined deformation coefficients and modules of elasticity as a function of the elastic constants and the five angles of inclination of the plane of isotropy and structural axes of the line deflection stretch plane of isotropy.*

*Keywords: offshore drilling platform, offshore base, Caspian Sea, core elements, shelf.*

**For citation:**

Sultanov, Timur T., and Gulnar M. Tlepiyeva “Stress-deformed condition of the marine drilling platform on the shelf of the Caspian Sea.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 960–974. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-960-974.

УДК 624.042.1

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МОРСКИХ БУРОВЫХ ПЛАТФОРМ НА ШЕЛЬФЕ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

**Т. Т. Султанов, Г. М. Тлепиева**

Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилёва,  
Астана, Республика Казахстан

*Современные пространственные сооружения в процессе работы подвержены различным силовым воздействиям, поэтому их конструктивные элементы находятся в сложном напряженно-деформированном состоянии, и отдельные узлы переходят в стадию пластического деформирования, что оказывает существенное влияние на точность расчетов. Определение кинематических и силовых факторов в каждом узловом элементе сооружений в зависимости от физико-механических и геометрических характеристик материалов, а также от величин и вида внешних усилий с целью назначения оптимальных параметров конструкций является проблемной задачей строительной механики и теории упругости. Рассматриваемые пространственные конструкции разбиваются на конечные элементы, взаимодействующие между собой в узлах. Все узлы нумеруются с указанием начала и конца каждого конечного элемента. Конструкция относится к глобальной системе координат OXYZ, причем глобальная система координат совпадает с системой координат грунтового массива. Мелкослоистое морское основание с жестко сцепленными наклонными слоями вблизи морского сооружения моделируется упругим анизотропным телом с плоскостью изотропии, наклоненной к горизонту под произвольным углом и совпадающей с плоскостью напластования слоев. Выводятся уравнения обобщенного закона Гука относительно декартовой системы координат OXYZ, ось OZ направлена вертикально вверх, оси OX и OY — горизонтально. Определяются коэффициенты деформа-*

ции и модули упругости в виде функций от пяти упругих постоянных углов наклона плоскости изотропии и отклонения оси конструкции от линии простираения плоскости изотропии.

*Ключевые слова:* морская буровая платформа, морское основание, Каспийское море, стержневые элементы, шельф.

**Для цитирования:**

Султанов Т. Т. Напряженно-деформированное состояние морских буровых платформ на шельфе Каспийского моря / Т. Т. Султанов, Г. М. Тлепиева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 960–974. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-960-974.

### **Введение (Introduction)**

В предлагаемой публикации рассматривается статическая задача о напряженном и деформированном состоянии системы «конструкции морская буровая платформа – морское основание» от действия вертикальных и горизонтальных нагрузок, действующих на сооружение. Излагаются разработанные алгоритмы решения статических задач методом конечных элементов с привлечением одно- и трехмерных конечных элементов и описывается методика составления разрешающих линейных алгебраических уравнений исследуемого объекта.

Геологические и лабораторные данные исследований дна Каспийского моря позволяют сделать вывод о том, что морские отложения являются трансверсально-изотропным наклонно-слоистым массивом, сформированным тремя плоскопараллельными слоями. Рассматриваемая область мысленно делится на систему прямоугольных параллелепипедов — элементов, контактирующих в узлах. Для параллелепипеда аппроксимирующие функции введем из условия, что перемещения в узлах распределяются по линейному закону независимо друг от друга [1], [2]. При расчетах массивных тел в методе конечных элементов используются зависимости для трехмерного напряженного состояния. Построение матрицы жесткости элемента может быть выполнено по следующей схеме: поле перемещений по области конечного элемента назначается как функция перемещений узлов; деформации в области конечных элементов выражаются через перемещения (соотношение Коши); напряжения в области конечных элементов выражаются через деформации (обобщенный закон Гука); на основе принципа возможных перемещений определяются жесткостные характеристики.

Пространственная конструкция морской буровой платформы, состоящая из упругих звеньев, разбивается на системы прямых стержневых и плоских элементов, соединенных жестко в узловых точках, которые последовательно пронумерованы. Кроме неподвижной глобальной системы координат рассматривается локальная система координат каждого стержня. Координаты узлов задаются. Допускается, что внешние силы известны, и действие внешних сил происходит в узлах. Перемещение любой точки элемента определяется формулами функций-форм [3].

При проектировании морской буровой платформы наибольшее внимание уделяется расчету на волновые нагрузки, основанные на теории регулярных и нерегулярных волн. До сих пор применявшиеся методы классической гидродинамики не учитывают случайный характер морского волнения. Для учета случайных процессов и полей предложен ряд аналитических аппроксимаций частотного спектра волн, которые демонстрируют развитое морское волнение в виде стационарного эргодического процесса. Для учета случайных процессов и полей был предложен ряд аналитических аппроксимаций частотного спектра волн: спектры Пирсона – Мошковица, Неймана, Стрекалова, Крылова, Бретшнайдера, Давидана, Джонсона.

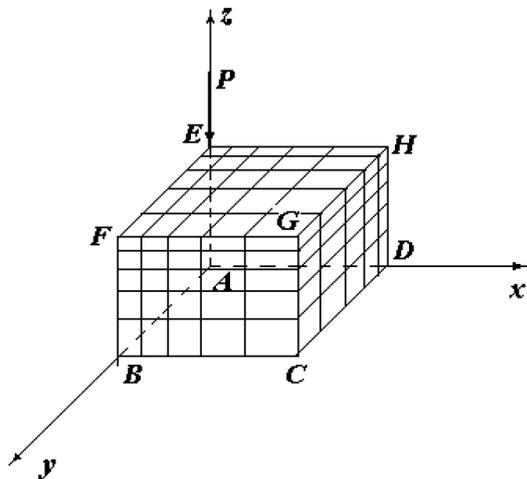
### **Теоретический метод исследования (Theoretical Method of Research)**

*Расчет морских буровых платформ на статические нагрузки.* Применение метода конечных элементов предполагает конечность размеров расчетной области вблизи морской буровой платформы типа «на сваях» в отличие от способа определения размеров породного массива вокруг сооружения при действии различных нагрузок (выбор способа зависит от размеров сооружения). С целью выбора размеров расчетной области, а также для проверки правильности разработанного алгоритма были проведены расчеты тестовой задачи на действие сосредоточенных нагрузок

на полупространство, которое было разбито на переменное количество призматических элементов с вариацией количества узлов в широком диапазоне: от 200 до 4000 узлов. Достоверность построенного алгоритма расчета расчетной области и расчетного объекта была протестирована отдельно на примере решения задачи о статическом упругом напряженном состоянии изотропного полупространства с упругими характеристиками:  $E = 10^6$  МПа,  $\nu = 0,2$  под действием вертикальной сосредоточенной силы  $P = 392$  кН на верхней границе (задача Буссинеска) и пространственной стержневой системы (задача Добровольского), для которых существует аналитическое решение.

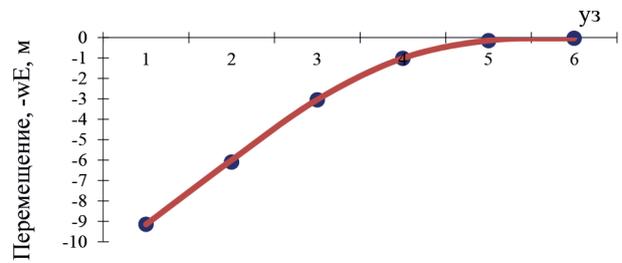
На рис. 1 (б)–(г) приведены значения перемещений, полученных аналитическим методом и методом конечных элементов. Как видно, использование призматических конечных элементов и стержневых элементов дает довольно точные значения перемещений, отклоняющихся от аналитических значений не более чем на 0,5 %. При этом следует отметить, что разбиение было достаточно грубым. Таким образом, предлагаемая расчетная область для изучения как статического, так и динамического поведения представляет собой четырехугольное полупространство с жестко закрепленными боковыми поверхностями с размерами, превышающими размеры основания морской буровой платформы примерно на 10 м.

а)

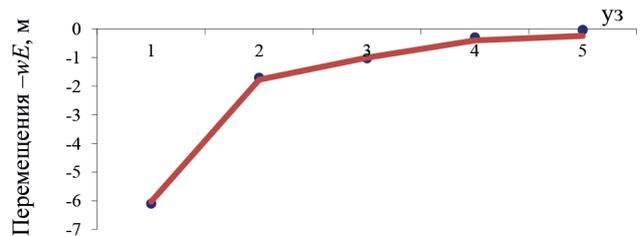


Граничные условия:  $u = v = w = 0$   
на  $ABCD$  ( $u = 0$ ), на  $AEHD$  ( $v = 0$ ), на  $AEFB$ ,  
все другие границы свободны

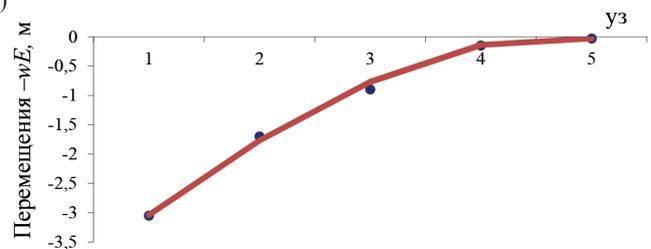
б)



в)



г)



• вычисленные значения — точное значение

Рис. 1. Тестовая задача Буссинеска — пример исследования трехмерного напряженного состояния:

а — расчетная схема; б — эпюра вертикальных перемещений при  $z = -15$  см;

в — эпюра вертикальных перемещений при  $z = -53,5$  см;

г — эпюра вертикальных перемещений при  $z = -114$  см

В табл. 1 приведены значения пяти значений упругих постоянных и параметров анизотропии, выявленных для сухих и влажных осадочных горных пород шельфа казахстанского сектора восточной части Каспийского моря и прибрежных зон. Сравнение значений упругих постоянных показывает, что увеличение влажности оказывает значительное влияние на прочностные характеристики, уменьшая их почти в 1,7 раза, но даже при различных влажных состояниях осадочные горные породы основания Каспийского моря обладают ярко выраженной анизотропией [4].

В дальнейшем в расчетах принимаются следующие допущения:

- в первом приближении массивная платформенная плита заменяется эквивалентной стержневой системой с характеристиками, соответствующей плите;
- нижняя опорная часть представляется в виде конечно-элементной системы с безынерционными элементами типа стержней (масса системы сосредотачивается в узловых точках);
- сооружение подвергается воздействию статической нагрузке от веса технологического оборудования и морского течения (течение предполагается установившимся с постоянной скоростью и некоррелированным волновым движением).

Таблица 1

**Механические и геометрические параметры расчетной области и расчетного объекта**

№ п/п.	Механические параметры	Единица измерения	Значение
Расчетный объект			
1	Сталь	Модуль упругости	кг/см <sup>2</sup>
		Коэффициент Пуассона	–
Расчетная область			
2	Верхней чехол — транстропный морской массив с естественной влажностью 13 %	Модуль упругости	кг/см <sup>2</sup>
		Модуль упругости	кг/см <sup>2</sup>
		Модуль сдвига	кг/см <sup>2</sup>
		Коэффициент Пуассона	–
		Коэффициент Пуассона	–
3	Транстропный морской массив с естественной влажностью 5 %	Модуль упругости	кг/см <sup>2</sup>
		Модуль упругости	кг/см <sup>2</sup>
		Модуль сдвига	кг/см <sup>2</sup>
		Коэффициент Пуассона	–
		Коэффициент Пуассона	–
4	Транстропный морской массив с естественной влажностью 0,6 %	Модуль упругости	кг/см <sup>2</sup>
		Модуль упругости	кг/см <sup>2</sup>
		Модуль сдвига	кг/см <sup>2</sup>
		Коэффициент Пуассона	–
		Коэффициент Пуассона	–

На рис. 2, а показана реально существующая конструкция морской буровой платформы на заземленных стальных основаниях шести опор, соединенных между собой раскосами, которые естественным образом разбиты на стержневые элементы. Во всех верхних узлах платформенной плиты действуют силы в зависимости от веса технологического оборудования и собственного веса по оси Z. На основании изложенного алгоритма расчета пространственной конструкции морской буровой платформы, состоящей из одно- и двумерных элементов, а также основания, состоящего из элементов в виде параллелепипеда, находящихся в равновесии под действием статических сил и моментов, составлена программа. В соответствии с методом конечных элементов морская буровая платформа разбита на 177 элементов, соединенных в 84 узлах, расчетные стержневые элементы изготовлены из стали с упругими физико-механическими характеристиками, приведенными в табл. 1.

При расчете пространственной конструкции морской буровой платформы были учтены следующие граничные условия:

- все узлы конструкций имеют жесткие соединения;
- конструкция верхней плитной части опирается на шесть жестких опор;

– в местах соединения с основанием в узлах конструкции отсутствуют углы поворота, но имеются перемещения (перемещение поверхности морского основания принимается равным перемещению в опорной части базы основания платформы), т. е. выполняется условие совместности работы системы [5].

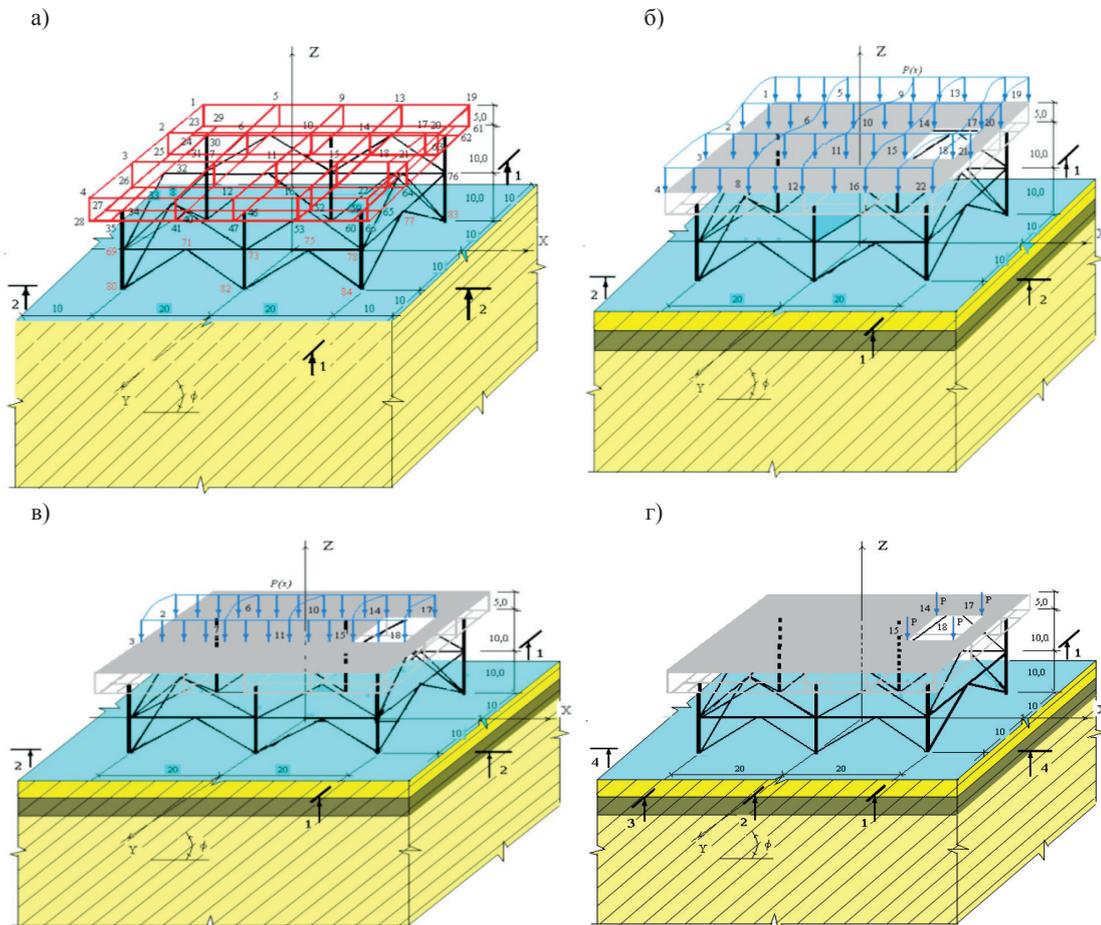


Рис. 2. Структурная схема расчетной области и расчетного объекта:  
 а — разбивка конструкции буровой платформы на конечные элементы;  
 б — разбивка конструкции с произвольными внешними усилиями по всей верхней плите;  
 в — разбивка конструкции с произвольными полосовыми внешними усилиями;  
 г — разбивка конструкции с сосредоточенными внешними усилиями на месте установки буровой вышки

### Результаты (Results)

Для реализации составленного алгоритма и программы выполняется расчет напряженно-деформированного состояния конструкций морской буровой платформы на слоистом морском основании. В качестве расчетной области рассматривается конструкция морской буровой платформы, опирающаяся шестью опорами на слоистое морское основание.

Конструкция морской буровой платформы заменяется эквивалентной стержневой системой, состоящей из 177 элементов, соединенных в 84 узлах (основание разбито на 4000 призматических элементов с общим количеством узлов 3249). Размеры нижнего полупространства приняты исходя из исключения влияния граничных условий на напряженно-деформированное состояние как сооружения, так и морского основания [6]. В местах соединения опор и слоистого основания ввиду малости углы поворота приняты равными нулю. Боковые грани расчетной области считаются жесткими (недеформируемыми) — см. рис. 2, а.

Морское основание слоистое, горные породы верхнего чехла до глубины 1 м имеют влажность 13 %, средняя часть — 5 %, коренные породы — 0,6 %. Конструкция морской буровой платформы выполнена из металла с упругими характеристиками. Для полноты сравнения напряженно-дефор-

мированного состояния конструкции морской платформы и ее основания выполнен расчет различных влажных горных пород, составляющих основание, причем естественная влажность с увеличением глубины залегания уменьшается. Для наглядности в табл. 1 введены механические и геометрические параметры пространственных значений расчетной области и объекта. Выполнены массовые и многовариантные расчеты для изучения статического упругого напряженного состояния морской буровой платформы и морского основания. Рассматриваемые внешние нагрузки действуют в следующих сочетаниях: по всей поверхности платформы (рис. 2, б), по полосе в средней части платформы (рис. 2, в), а также в местах установки буровой вышки (рис. 2, г).

Рассмотрим начальное упругое и упруго-ползучее напряженно-деформированные состояния системы «морская буровая платформа – анизотропное основание», находящейся под действием распределенной нагрузки по всей верхней плите платформы (см. рис. 2, б).

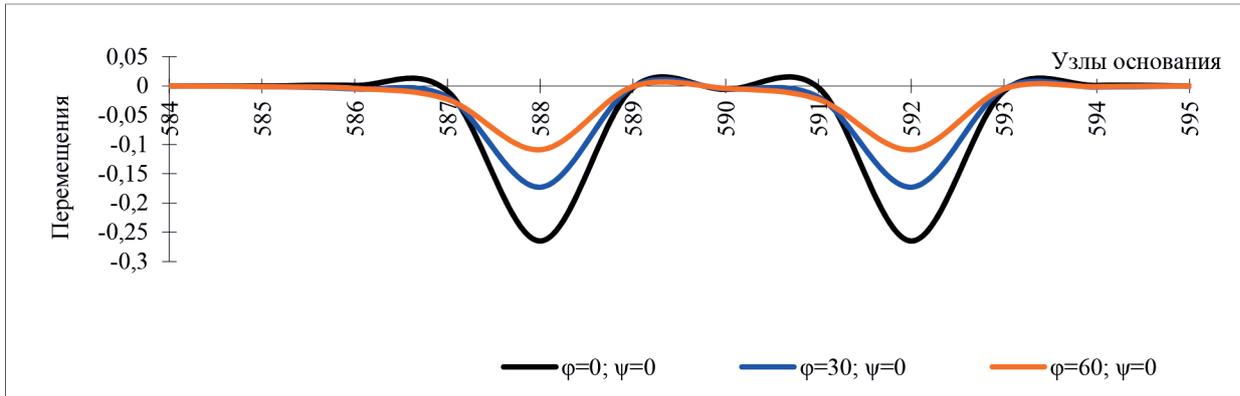
На рис. 3 показаны эпюры упругих перемещений  $w$  на границе изучаемого области, а в табл. 2 приведены значения упругих перемещений изучаемого объекта с течением времени. Величина угла падения плоскости изотропии оказывает существенное влияние на характер распределения перемещений: с ростом угла падения плоскости слоев пород  $\varphi$  вертикальные перемещения значительно уменьшаются, при этом угол отклонения оси сооружения линии простирания плоскости изотропии не оказывает влияния на характер перемещений, сказывается удаленность опор друг от друга. При любом угле падения плоскости изотропии слоистых пород величины перемещений почти в три раза больше, чем соответствующие перемещения в изотропном упругом основании.

Таблица 2

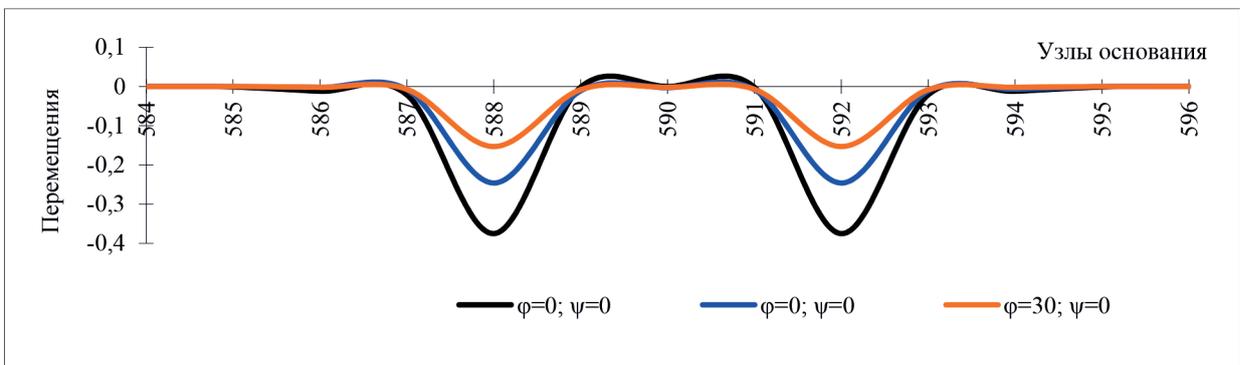
**Значения упругих перемещений конструкций морской буровой платформы в зависимости от угла наклона  $\varphi$  с учетом ползучести морского основания  $10^{-6} \cdot P$  при действии внешних сил на верхнюю плитную часть платформы**

Номер узла	Перемещения с учетом фактора времени и угла наклона плоскости изотропии, град.									
	$t = 0$			$t = 120$			$t = 600$			
	$\varphi = 0$	$\varphi = 30$	$\varphi = 60$	$\varphi = 0$	$\varphi = 30$	$\varphi = 60$	$\varphi = 0$	$\varphi = 30$	$\varphi = 60$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Верхняя плитная часть	3	-2,627	-1,896	-1,367	-3,635	-2,629	-1,897	-5,027	-3,632	-2,625
	4	0,098	0,070	0,050	0,137	0,099	0,072	0,191	0,135	0,096
	7	2,873	2,136	1,588	3,868	2,875	2,138	5,210	3,865	2,871
	8	1,374	0,981	0,699	1,918	1,377	0,984	2,673	1,914	1,372
	11	0,426	0,333	0,261	0,546	0,428	0,335	0,703	0,542	0,423
	12	0,106	0,087	0,072	0,129	0,108	0,089	0,159	0,125	0,104
	15	-13,43	-10,14	-7,667	-17,80	-13,43	-10,14	-23,62	-17,80	-13,43
	16	1,073	0,802	0,600	1,435	1,074	0,805	1,918	1,431	1,071
	21	-0,099	-0,048	-0,017	-0,181	-0,101	-0,049	-0,309	-0,180	-0,097
	22	-0,239	-0,180	-0,136	-0,317	-0,241	-0,183	-0,420	-0,315	-0,236
	26	-0,712	-0,556	-0,434	-0,908	-0,714	-0,558	-1,157	-0,907	-0,709
	27	-4,028	-2,909	-2,099	-5,572	-4,029	-2,911	-7,704	-5,571	-4,026
	28	0,278	0,198	0,141	0,388	0,279	0,201	0,541	0,385	0,276
	32	-0,025	-0,013	-0,005	-0,044	-0,027	-0,015	-0,072	-0,041	-0,023
33	-0,013	-0,016	-0,017	-0,007	-0,015	-0,017	0,007	-0,009	-0,011	
34	0,050	0,036	0,027	0,067	0,052	0,037	0,091	0,069	0,048	
35	0,083	0,061	0,045	0,113	0,087	0,064	0,154	0,115	0,081	
39	-0,160	-0,115	-0,082	-0,224	-0,163	-0,116	-0,315	-0,223	-0,158	
41	-0,005	-0,004	-0,004	-0,005	-0,005	-0,005	-0,007	-0,007	-0,007	
45	-0,354	-0,258	-0,188	-0,484	-0,357	-0,261	-0,661	-0,481	-0,352	
47	-0,111	-0,081	-0,059	-0,153	-0,113	-0,083	-0,209	-0,154	-0,110	
51	0,443	0,330	0,246	0,594	0,446	0,332	0,797	0,596	0,441	
53	-0,007	-0,006	-0,005	-0,008	-0,006	-0,004	-0,009	-0,008	-0,007	
57	1,038	0,745	0,531	1,440	1,041	0,746	1,987	1,437	1,036	
58	-0,223	-0,164	-0,120	-0,304	-0,226	-0,167	-0,412	-0,301	-0,221	
59	-0,072	-0,051	-0,036	-0,100	-0,075	-0,053	-0,138	-0,099	-0,071	
64	-0,031	-0,022	-0,015	-0,043	-0,034	-0,024	-0,061	-0,041	-0,029	
66	-0,024	-0,017	-0,012	-0,035	-0,025	-0,019	-0,049	-0,037	-0,023	
69	0,080	0,061	0,046	0,103	0,083	0,063	0,132	0,100	0,078	
73	0,021	0,016	0,012	0,028	0,024	0,018	0,038	0,025	0,020	
75	0,019	0,010	0,004	0,033	0,021	0,012	0,055	0,031	0,017	
78	-0,005	-0,003	-0,002	-0,006	-0,004	-0,003	-0,009	-0,006	-0,005	
84	-0,086	-0,053	-0,034	-0,126	-0,089	-0,056	-0,183	-0,123	-0,070	

а)



б)



в)

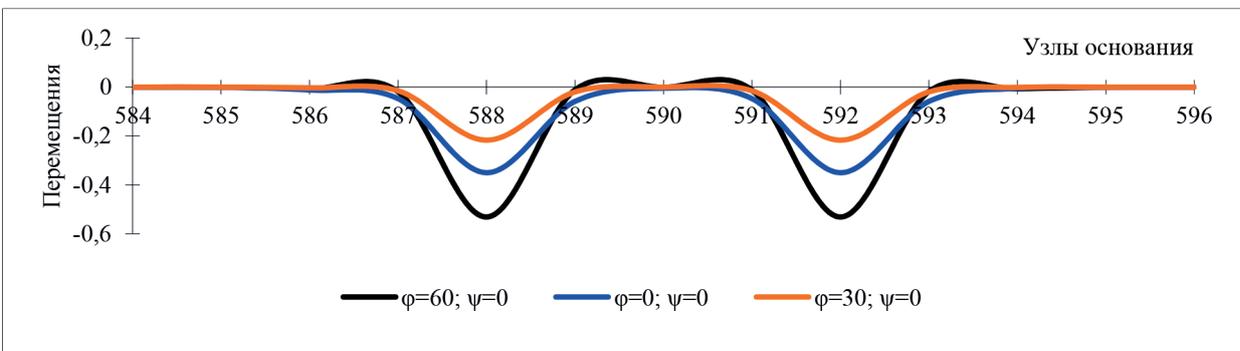
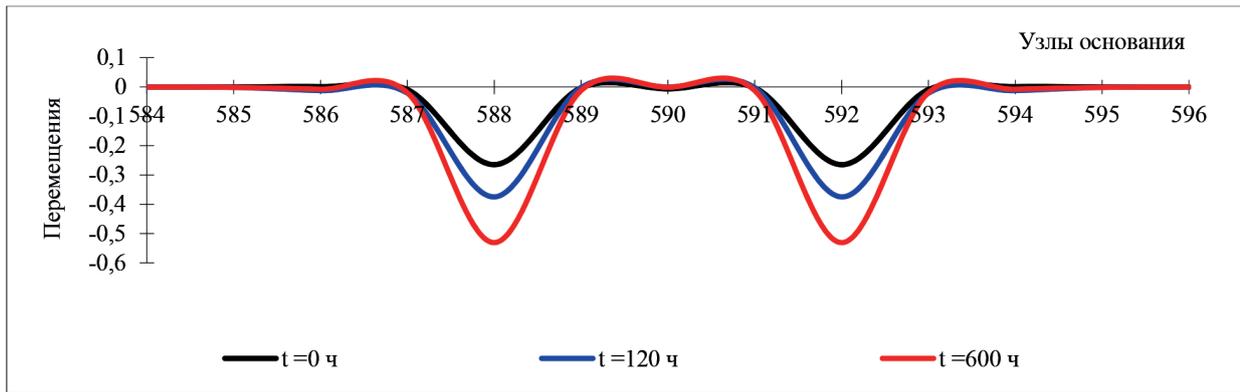


Рис. 3. Эпюры упругих перемещений ( $10^{-6}P$ ) морского основания в сечении  $I-I$  в зависимости от углов наклона  $\varphi$  и отклонения оси сооружения от простирания  $\psi$  плоскости изотропии под действием произвольных внешних нагрузок по всей верхней плите в разные моменты времени: а — при  $t = 0$  ч; б — при  $t = 120$  ч; в — при  $t = 600$  ч

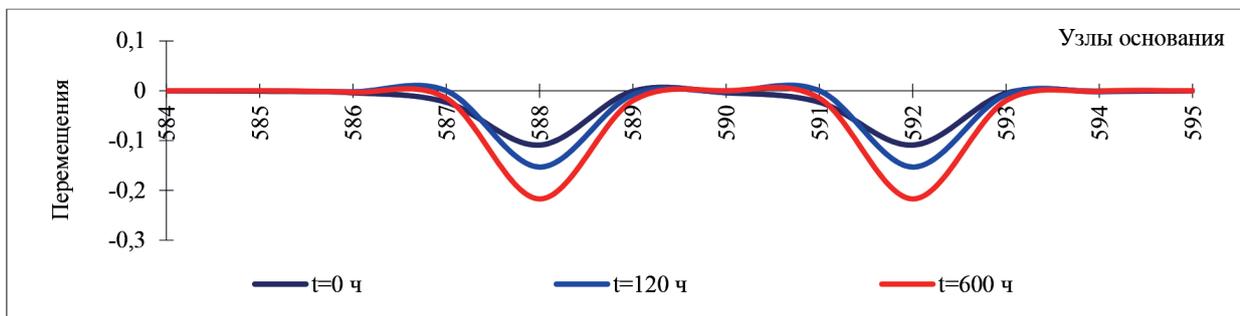
На рис. 4 и 5 показаны перемещения только для двух опор по оси  $Y$  (сечение  $I-I$ ) и трех опор по оси  $X$  (сечение  $2-2$ ), однако характер перемещений не меняется и для других опор. С течением времени перемещения основания растут только в области действия силы, т. е. наблюдается местная ползучесть горных пород.

Рассмотрим упругое напряженно-деформированное состояние системы, находящейся под действием полосовой распределенной нагрузки вдоль пролета верхней плиты платформы в различные промежутки времени.

а)



б)



в)

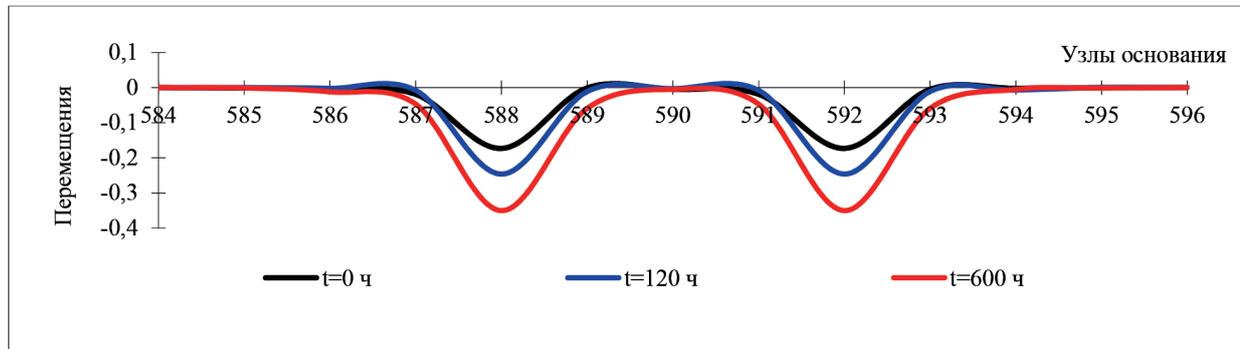
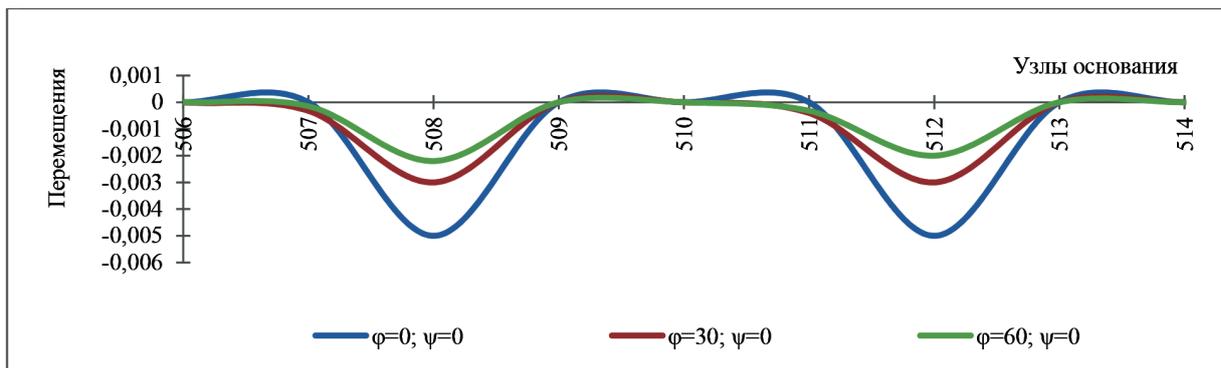


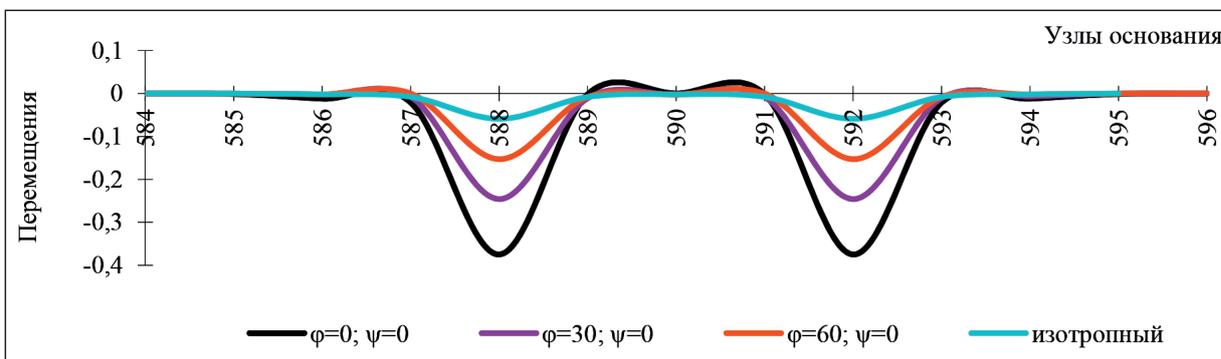
Рис. 4. Эпюры упругих перемещений ( $10^{-6}P$ ) морского основания в сечении 1-1 при фиксированных углах наклона  $\varphi$  и отклонения оси сооружения от простирания  $\psi$  плоскости изотропии под действием произвольных внешних нагрузок по всей верхней плите:  
 а — при  $\varphi = 0^\circ$ ; б — при  $\varphi = 30^\circ$ ; в — при  $\varphi = 60^\circ$

На рис. 6 показаны эпюры упругих и упруго-ползучих перемещений  $w$  на границе изучаемого объекта, а в табл. 3 приведены значения его упругих перемещений и напряжений. Величина угла падения плоскости изотропии коренным образом влияет на характер распределения перемещений: с ростом угла падения плоскости слоев пород  $\varphi$  вертикальные перемещения значительно уменьшаются, при этом угол отклонения оси сооружения линии простирания плоскости изотропии не влияет на характер перемещений. Кроме того, на величину перемещений оказывает влияние и интенсивность действующей силы. При любом угле падения плоскости изотропии слоистых пород величины перемещений почти в три раза больше, чем соответствующие перемещения в упругом изотропном основании. При расположении опор на плоскости изотропии наблюдается смещение в сторону и дальнейшее увеличение угла падения до  $\varphi = 60$ , что приводит к выпору породы (см. рис. 5, в).

а)



б)



в)

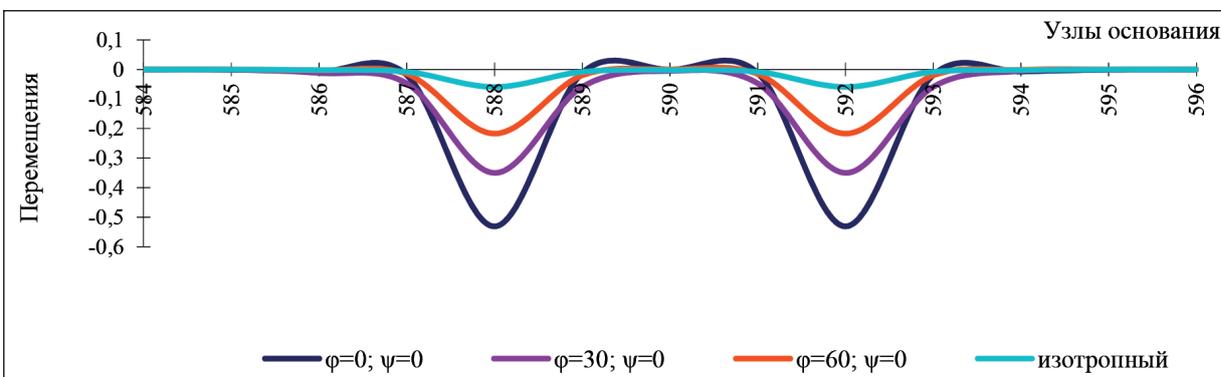
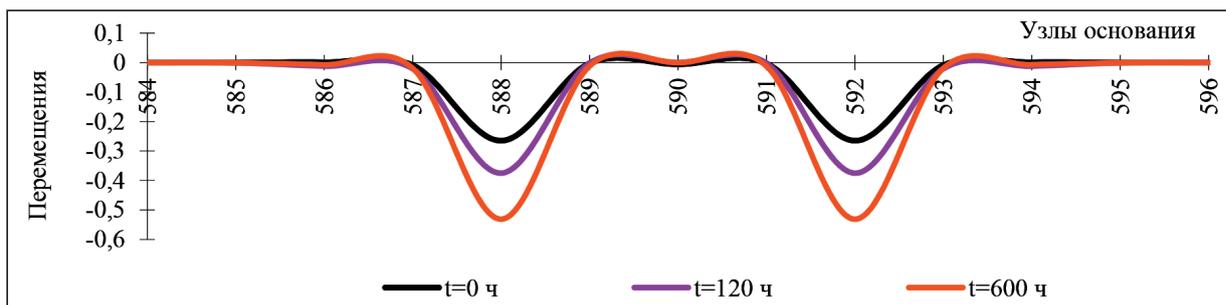
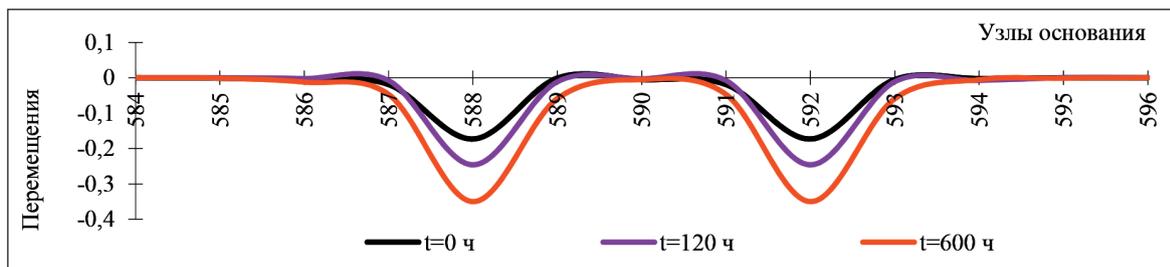


Рис. 5. Эпюры упругих перемещений ( $10^{-6}P$ ) морского основания в сечении 2-2 в зависимости от углов наклона  $\varphi$ , отклонения оси сооружения простираения  $\psi$  плоскости изотропии и действующих произвольных внешних нагрузок на полосе плиты в различные моменты времени: а — в начальный момент времени при  $t = 0$ ; б — при  $t = 120$  ч; в — при  $t = 600$  ч

а)



б)



в)

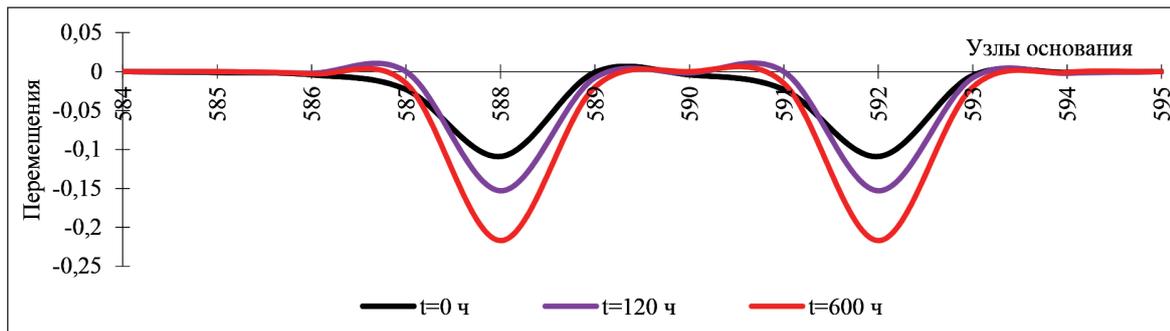


Рис. 6. Эпюры упругих перемещений ( $10^{-6}P$ ) морского основания в сечении 1-1 при фиксированных углах наклона  $\varphi$  и отклонения оси сооружения от простираения  $\psi$  плоскости изотропии при действии произвольных внешних нагрузок по всей верхней плите в разные моменты времени:  
 а — при  $\varphi = 0^\circ$ ; б — при  $\varphi = 30^\circ$ ; в — при  $\varphi = 60^\circ$  (окончание)

Таблица 3

**Значения упругих перемещений  $10^{-6}P$  конструкций морской буровой платформы в зависимости от угла наклона  $\varphi$  плоскости изотропии морского основания с учетом фактора времени под действием полосовой внешней распределенной нагрузки на платформу в узлах 2, 3, 6, 7, 10, 11, 14, 15, 18, 17**

Номер узла	Перемещения с учетом фактора времени и угла наклона плоскости изотропии, град.									
	$t = 0$			$t = 120$			$t = 600$			
	$\varphi = 0$	$\varphi = 30$	$\varphi = 60$	$\varphi = 0$	$\varphi = 30$	$\varphi = 60$	$\varphi = 0$	$\varphi = 30$	$\varphi = 60$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Верхняя плитная часть	3	-6,748	-4,986	-3,689	-9,142	-6,750	-4,988	-12,40	-9,145	-6,75
	4	0,349	0,262	0,197	0,466	0,352	0,265	0,621	0,468	0,349
	7	3,454	2,460	1,738	4,818	3,456	2,462	6,689	4,820	3,454
	8	2,967	2,153	1,561	4,086	2,969	2,155	5,625	4,089	2,967
	11	0,775	0,603	0,470	1,000	0,779	0,605	1,294	1,005	0,775
	12	0,104	0,073	0,052	0,147	0,107	0,075	0,206	0,149	0,104
	15	-13,10	-9,814	-7,364	-17,50	-13,10	-9,817	-23,41	-17,50	-13,1
	16	0,973	0,728	0,545	1,300	0,975	0,729	1,738	1,303	0,973
	18	-0,035	-0,014	-0,001	-0,064	-0,037	-0,016	-0,103	-0,067	-0,035
	21	0,044	0,067	0,074	-0,003	0,046	0,069	-0,087	-0,006	0,044
Нижняя плитная часть	22	-0,199	-0,153	-0,117	-0,261	-0,201	-0,154	-0,342	-0,264	-0,199
	26	-0,857	-0,661	-0,509	-1,110	-0,860	-0,663	-1,435	-1,114	-0,857
	27	-3,768	-2,710	-1,948	-5,235	-3,772	-2,712	-7,268	-5,238	-3,77
	28	0,255	0,182	0,129	0,356	0,257	0,183	0,498	0,358	0,255
	33	0,011	0,003	-0,002	0,025	0,014	0,005	0,046	0,027	0,011
	34	0,049	0,036	0,026	0,067	0,051	0,037	0,091	0,069	0,049
	35	0,087	0,064	0,047	0,119	0,089	0,066	0,162	0,121	0,087
	39	-0,143	-0,102	-0,073	-0,200	-0,146	-0,104	-0,282	-0,204	-0,143
	45	-1,077	-0,760	-0,536	-1,522	-1,079	-0,762	-2,151	-1,524	-1,08
	46	-0,088	-0,062	-0,043	-0,124	-0,091	-0,064	-0,174	-0,126	-0,088
	47	-0,311	-0,216	-0,150	-0,446	-0,314	-0,217	-0,638	-0,448	-0,311
	51	-0,216	-0,191	-0,166	-0,239	-0,218	-0,195	-0,254	-0,242	-0,216
	52	0,014	0,013	0,012	0,013	0,017	0,014	0,012	0,015	0,014
	57	0,427	0,313	0,227	0,578	0,429	0,314	0,774	0,580	0,427
	58	-0,231	-0,169	-0,123	-0,315	-0,233	-0,172	-0,429	-0,317	-0,231

Таблица 3  
(Окончание)

59	-0,087	-0,060	-0,041	-0,125	-0,089	-0,062	-0,178	-0,126	-0,087
64	-0,029	-0,020	-0,014	-0,041	-0,031	-0,023	-0,058	-0,044	-0,029
65	0,004	0,002	0,000	0,009	0,007	0,004	0,015	0,011	0,004
66	-0,032	-0,022	-0,015	-0,046	-0,035	-0,024	-0,065	-0,048	-0,032
69	0,080	0,061	0,047	0,102	0,081	0,064	0,130	0,105	0,080
78	-0,004	-0,003	-0,002	-0,006	-0,006	-0,004	-0,008	-0,006	-0,004
80	-0,265	-0,173	-0,109	-0,375	-0,246	-0,153	-0,531	-0,350	-0,217

На рис. 7 показаны перемещения для разных моментов времени при углах наклона плоскости изотропии  $\varphi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$  только для двух опор сечения  $l-l$ , однако характер перемещений не меняется и для других пар опор. При фиксированных углах падения плоскости изотропии на перемещения оказывает влияние длительность приложенной нагрузки.

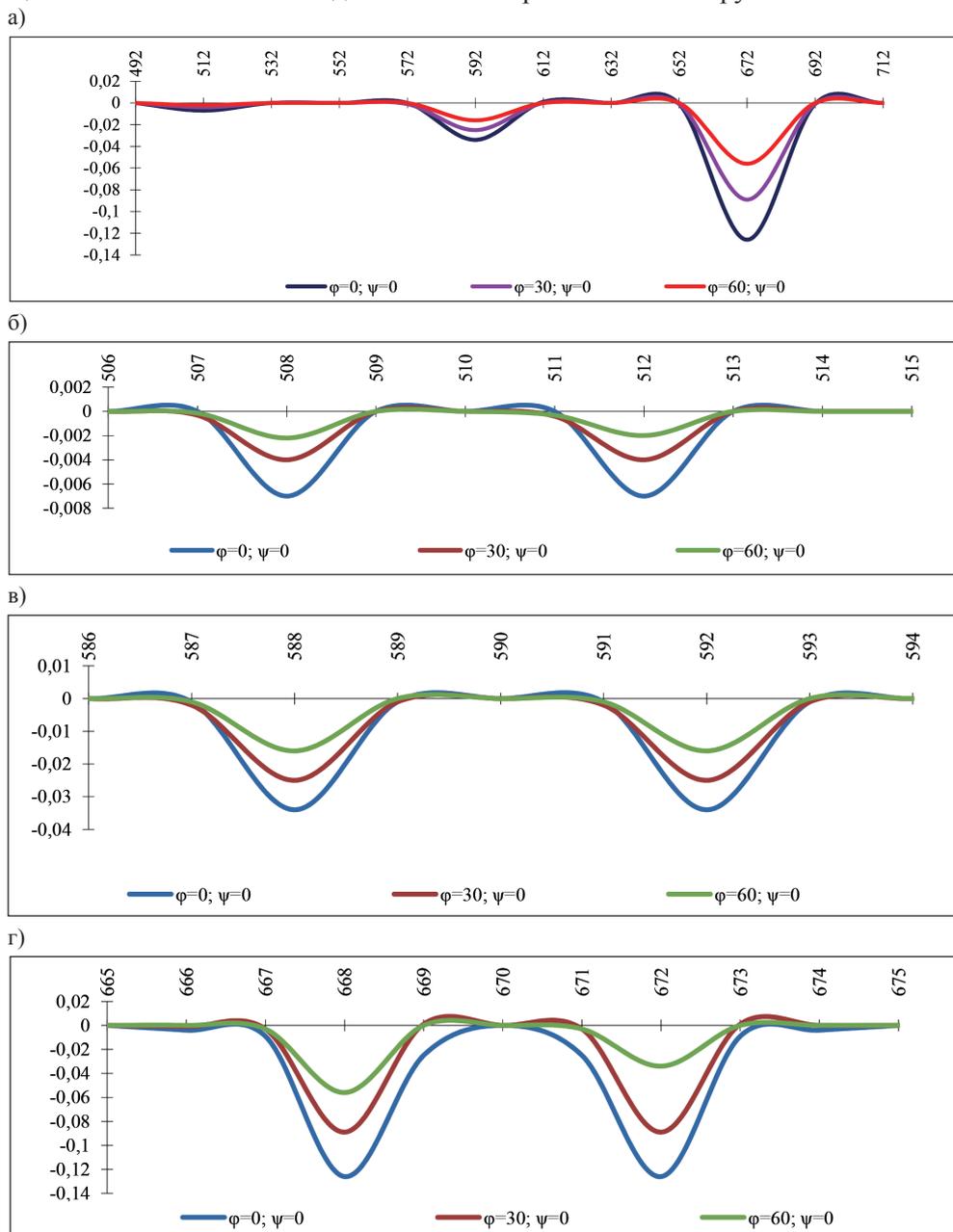


Рис. 7. Эпюры начальных упругих перемещений  $10^{-6} \times P$  поверхности морского дна в сечении 4-4 в зависимости от углов наклона  $\varphi$  и отклонения оси сооружения от линии простираения  $\psi$  плоскости изотропии основания под действием сосредоточенных нагрузок в местах установки буровой вышки: а — в сечении 4-4; б — в сечении 3-3; в — в сечении 2-2; г — в сечении 1-1

Иная картина наблюдается под действием сосредоточенной нагрузки в узлах 14, 15, 17, 18 верхней плиты платформы в точках расположения буровой вышки (см. рис. 2, з). Ползучесть горных пород основания оказывает влияние на значения перемещений: до времени стабилизации деформации осадка морского дна увеличивается в 2 раза под опорами, где нет нагрузок, в средней части она увеличивается в 3 раза, а под опорами, где непосредственно действуют внешние усилия — в 4 раза. На рис. 8 приведены эпюры упругих перемещений в сечениях в зависимости от значений углов  $\varphi$ .

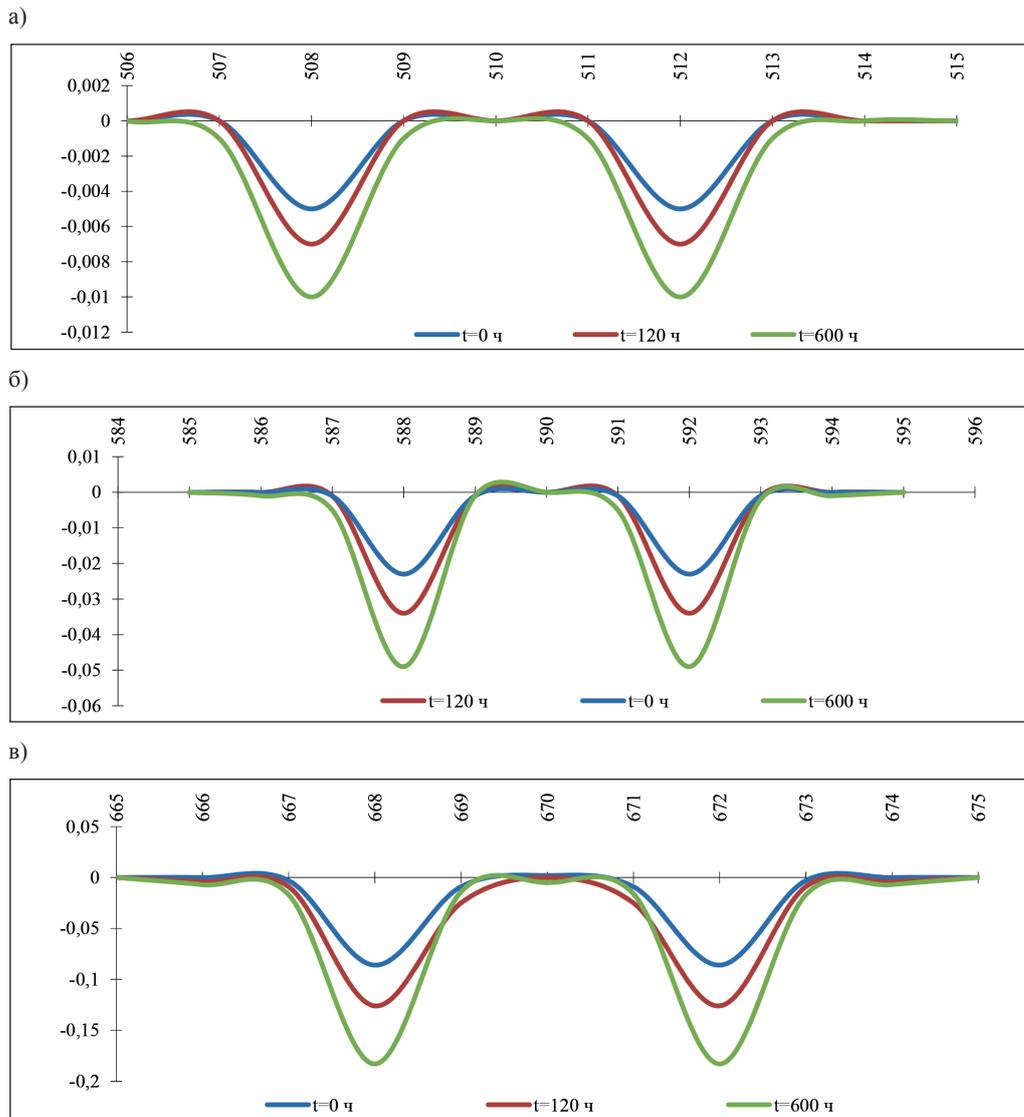


Рис. 8. Эпюры упругих перемещений ( $10^{-6} \times P$ ) поверхности морского дна в сечении 1-1 в условиях ползучести основания при  $\varphi = 30^\circ$  под действием сосредоточенных нагрузок в местах установки буровой вышки: а — в сечении 1-1; б — в сечении 2-2; в — в сечении 3-3

### Обсуждение (Discussion)

Характерный для шельфа Каспийского моря наклоннослоистый массив морского основания с жесткосцепленными между собой плоскопараллельными слоями представляет собой упругое трансотропное тело с плоскостью изотропии, совпадающей с плоскостью напластования слоев, и условно подчиняющийся уравнениям основного закона Гука для общего слоя анизотропии. Коэффициенты деформации и модули упругости зависят от пяти упругих постоянных, угла наклона плоскости изотропии и угла отклонения оси нефтепромыслового сооружения от плоскости простирания плоскости изотропии [7], [8].

Пространственная конструкция разбивается на стержневые элементы, взаимодействующие между собой в узлах. Все узлы и элементы нумеруются, причем указываются начало и конец каждого расчетного элемента. Способ разбивки изучаемого объекта является произвольным, но в местах наибольших изменений кинематических и силовых характеристик следует сгущать сетки конечных элементов [9], [10].

Определение волновых нагрузок производится в два этапа: первый этап — используя соответствующую волновую теорию, определяют изменение поверхности воды и кинематику потока жидкости, начиная с изменения волновой поверхности моря по высоте; второй этап — исходя из формулы Морисона или дифракционной теории, определяют гидродинамические силы. Ветровая нагрузка состоит из двух слагаемых: первая — статическая составляющая — соответствует установившемуся скоростному напору, вторая — пульсационная составляющая нагрузки от ветра — описывается эмпирическим спектром Давенпорта. Течение на Каспийском море установившееся и действующее с постоянной скоростью, а нагрузка, действующая на вертикальную опору, определяется формулой Морисона. При воздействии течения на сооружения вокруг опоры образуются вихревые следы. Когда вихревые следы отделяются от преград, вокруг них остается равная ей и противоположно направленная циркуляция. Это приводит к образованию боковой силы, действующей перпендикулярно направлению течения. Силы бокового давления зависят от скорости потока и диаметра преграды. Давление льда на опору принимается по формуле Коржавина.

### Заключение (Conclusion)

В данной работе рассмотрены статические задачи оценки упругого напряженного и деформированного состояния системы «морская буровая платформа – донное основание» в зависимости от действия вертикальных статических и горизонтальных сил, а также предложена методическая основа приближенного расчета методом конечных элементов с разработкой алгоритмов и пакетом прикладных программ.

С целью установления размеров расчетной области и количества расчетных элементов, а также для проведения проверки разработанных алгоритмов на основе составленного пакета прикладной программы решен ряд тестовых задач: выполнено сравнение значений напряжений в разных точках изотропного полупространства от действия вертикальной сосредоточенной силы  $P$ , полученных аналитическим методом, со значениями, полученными методом конечных элементов; проведены сравнения значений напряжений в стержневых элементах под действием сосредоточенной силы  $P$  в одном элементе со значениями, полученными по методу конечных элементов.

Выполнением многовариантных расчетов было установлено, что при действии сосредоточенных и распределенных сил угол наклона плоскости изотропии и угол отклонения оси морской буровой платформы существенным образом влияет на закономерности распределения напряжений и перемещений как в конструкциях морской буровой платформы, так в донном основании: наибольшие напряжения и перемещения контактной поверхности наблюдаются при горизонтальном залегании слоев массива.

Проанализировав полученные численные результаты, следует отметить, что во всех случаях действия внешних сил значения статических перемещений и напряжений в конструкциях морской буровой платформы и морском основании зависят только от угла наклона плоскости изотропии  $\varphi$ . Угол отклонения оси сооружения от линии простирания  $\psi$  оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние системы «морская буровая платформа – анизотропное морское основание» в том случае, когда опоры расположены друг от друга на расстоянии, равном или меньшем высоты опоры.

Увеличение угла наклона плоскости изотропии оказывает существенное влияние на зону распространения статических перемещений и напряжений в массиве, а именно происходит сужение зоны. Следует отметить, что увеличение угла наклона плоскости изотропии  $\varphi$  оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние конструкции нижней части платформы, заметно

уменьшая значения напряжений, но в то же время не влияет на концентрацию напряжений в зоне выреза установки буровой вышки, что оказывает влияние на верхнюю плитную часть. Влажность горных пород, слагающих морское дно, сказывается на количестве перемещений, увеличивая значения примерно в 1,5 раза, при этом напряжения, соответственно, уменьшаются в 1,5 раза.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов В. И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах / В. И. Осипов // Грунтоведение. — 2013. — Т. 2. — № 3. — С. 3–35.
2. Краснощечков Ю. В. Основы проектирования конструкций зданий и сооружений / Ю. В. Краснощечков, М. Ю. Заполева. — М.: Инфра-Инженерия, 2018. — 296 с.
3. Ermakova A. V. Additional Finite Element Method for Analysis of Reinforced Concrete Structures at Limit States / A. V. Ermakova. — M: Publishing house ASV, 2012. — 114 p.
4. Лобковский Л. И. Технологии комплексного мониторинга акваторий в условиях освоения нефтегазовых месторождений / Л. И. Лобковский, С. А. Ковачев // Труды Международного симпозиума «Инновационные технологии в исследовании окружающей среды «RE: 2013 – Research Environments 2013». — М.; Ларнака (Кипр): МФТИ, 2013. — С. 24–34.
5. Безродных Ю. П. Инженерно-геологические изыскания, выполняемые на акватории Каспийского моря / Ю. П. Безродных // Инженерные изыскания. — 2014. — № 4. — С. 54–58.
6. Маштаков А. С. Геологические и геодинамические риски, возникающие при взаимодействии нефтяных платформ с грунтом в Каспийском море / А. С. Маштаков // Интернет-Вестник ВолгГАСУ. — 2013. — № 3 (28). — С. 5.
7. Беспалов А. Г. Гидротехнические сооружения / А. Г. Беспалов [и др.] — М.: КНОРУС; Астрахань: АГУ, ИД «Астраханский университет», 2016. — 94 с.
8. Постников М. М. Механика грунтов, основания и фундаменты / М. М. Постников. — СПб.: Лань КПТ, 2016. — 416 с.
9. Suleimenov T. Road design by taking into account analysis of stress-strain state of bare boards / T. Suleimenov [et al.] // New Trends in Process Control and Production Management. — London: CRC Press, 2018. — Pp. 497–507.
10. Султанов Т. Т. Напряженно-деформированное состояние конструкций морского порта «подпорная стенка – фундаментная плита – анизотропное основание» / Т. Т. Султанов, Г. М. Тлепиева, Ш. Ш. Саттарова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 122–134. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-122-134.

### REFERENCES

1. Osipov, V. I. “Fiziko-khimicheskaya teoriya effektivnykh napryazhenii v gruntakh.” *Gruntovedenie* 2.3 (2013): 3–35.
2. Krasnoshechikov, Yu. V., and M. Yu. Zapolleva. *Osnovy proektirovaniya konstruktssii zdaniy i sooruzhenii*. M.: Infa-Inzheneriya, 2018.
3. Ermakova, A. V. *Additional Finite Element Method for Analysis of Reinforced Concrete Structures at Limit States*. M: Publishing house ASV, 2012.
4. Lobkovskii, L. I., and S. A. Kovachev. “Tekhnologii kompleksnogo monitoringa akvatorii v usloviyakh osvoeniya neftegazovykh mestorozhdenii.” *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Innovatsionnye tekhnologii v issledovanii okruzhayushchei sredy «RE: 2013 – Research Environments 2013»*. M.–Larnaka Kipr: MFTI, 2013. 24–34.
5. Bezrodnykh, Yu. P. “Engineering-geological surveys carried out in the Caspian sea water area for development of the oil and gas resources.” *Inzhenernye izyskaniya* 4 (2014): 54–58.
6. Mashtakov, Aleksandr Sergeevich. “Geological and geodynamic risks arising at interaction of oil platforms and soil in the Caspian Sea.” *Internet-Vestnik VolgGASU* 3(28) (2013): 5.
7. Bespalov, A. G., A. L. Sal’nikov, O. N. Bespalova, and S. A. Davydova. *Gidrotekhnicheskie sooruzheniya*. M.: KNORUS; Astrakhan’: AGU, ID «Astrakhanskii universitet», 2016.
8. Postnikov, M. M. *Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenty*. SPb.: Lan’ KPT, 2016.

9. Suleimenov, T., T. Sultanov, G. Tlepiyeva, and Y. Sovet. "Road design by taking into account the analysis of stress-strain state of bare boards." *New Trends in Process Control and Production Management*. Edited By Lenka Štofová, and Petra Szaryszová. CRC Press, 2017. 497–505.

10. Sultanov, Timur T., Gulnar M. Tlepiyeva, and Sholpan Sh. Sattarova. "The stress deformed state of marine port structures with support wall as fundamental plate." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.1 (2018): 122–134. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-122-134.

---

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Султанов Тимур Тулеугалиевич** —  
кандидат технических наук, доцент  
Евразийский национальный университет  
имени Л. Н. Гумилёва  
010000, Республика Казахстан, Астана,  
ул. Сатпаева, 3  
e-mail: [rumit78@mail.ru](mailto:rumit78@mail.ru)

**Тлепиева Гульнар Муратовна** —  
кандидат технических наук, доцент  
Евразийский национальный университет  
имени Л. Н. Гумилёва  
010000, Республика Казахстан, Астана,  
ул. Сатпаева, 3  
e-mail: [tlepiyevagm@yandexl.ru](mailto:tlepiyevagm@yandexl.ru)

---

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Sultanov, Timur T.** —  
PhD, associate professor  
Eurasian National University named  
after L.N. Gumilev  
3 Satpaev Str., Astana, 010000,  
Republic of Kazakhstan  
e-mail: [rumit78@mail.ru](mailto:rumit78@mail.ru)

**Tlepiyeva, Gulnar M.** —  
PhD, associate professor  
Eurasian National University named  
after L.N. Gumilev  
3 Satpaev Str., Astana, 010000,  
Republic of Kazakhstan  
e-mail: [tlepiyevagm@yandexl.ru](mailto:tlepiyevagm@yandexl.ru)

*Статья поступила в редакцию 17 сентября 2018 г.  
Received: September 17, 2018.*