

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-122-134

THE STRESS DEFORMED STATE OF MARINE PORT STRUCTURES WITH SUPPORT WALL AS FUNDAMENTAL PLATE

T. T. Sultanov, G. M. Tlepiyeva, Sh. Sh. Sattarova

Eurasian National University named after L.N. Gumilev,
Astana, Republic of Kazakhstan

Modern spatial structures in the process are subject to various force effects, so their components are in a difficult stress-strain state and the individual components pass into the stage of plastic deformation, which significantly affects 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: seaport, retaining wall, foundation plate, anisotropic base.

For citation:

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.

УДК 624.137.4

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОНСТРУКЦИЙ МОРСКОГО ПОРТА «ПОДПОРНАЯ СТЕНКА — ФУНДАМЕНТНАЯ ПЛИТА — АНИЗОТРОПНОЕ ОСНОВАНИЕ»

Т. Т. Султанов, Г. М. Тлепиева, Ш. Ш. Саттарова

Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,
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 основание с жесткосцепленными наклонными слоями вблизи 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 деформации и модули упругости в виде функций от пяти упругих постоянных и углов наклона плоскости изотропии и отклонения оси конструкции от линии простираения плоскости изотропии.

Ключевые слова: морской порт, подпорная стенка, фундаментная плита, анизотропное основание.

Для цитирования:

Султанов Т. Т. Напряженно-деформированное состояние конструкций морского порта «подпорная стенка — фундаментная плита — анизотропное основание» / Т. Т. Султанов, Г. М. Глепиева, 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.

Введение (Introduction)

Для осуществления взаимодействия между сооружениями и грунтовым основанием проектируются единые по назначению, но многообразные по конструкции, методам расчета и технологии изготовления фундаментные конструкции. Стоимость оснований и фундаментов современных промышленных и гражданских зданий составляет 10 – 12 % стоимости всего сооружения. Для плотин, шлюзов, мостовых устоев, подпорных стен морского порта, башен и резервуаров она достигает 40 – 60 % общей стоимости [1]. На устройство фундаментов расходуется до 25 % трудовых затрат и до 40 % рабочего времени [2]. Большой проблемой является также обеспечение устойчивости морских буровых платформ с учетом особенности грунтового основания [3].

Наряду со знанием напряженно-деформированного состояния конструкций и фундаментов чрезвычайно важным является изучение грунтов, составляющих морское дно, свойства которых входят в расчетные параметры задач. При этом особенно важно определить прочность грунтового основания на сдвиг по поверхности дна, глубинный сдвиг и разрушение давлением. Достоверность данных повысится, если учесть анизотропные деформационные, прочностные и реологические свойства грунтового основания, ориентацию плоскостей изотропии относительно поверхности дна и распределение анизотропных напряжений в местах опирания сооружения на морское дно. Известны случаи опрокидывания одного из глубоководных сооружений на Каспии из-за потери прочности горных пород основания вблизи опоры морской буровой платформы [4].

Многообразие свойств грунтовых оснований, зависящее не только от условий их естественного залегания, но и от напряженного состояния, влажности и температуры и т. д., конечно, нельзя описать достаточно полно и детально с помощью конструкций простых схем, поэтому возникает задача создания расчетных моделей основания, не противоречащих позиции механики грунтов, строительной механики и теории упругости. Изучение схемы работы основания в результате создания и анализа различных конкурирующих моделей, выбор и обоснование расчетной модели основания является весьма ответственной частью расчета, поэтому теория расчета конструкций и фундаментов на упругом основании приобретает все большее значение. Уточнение расчетных методов и моделей основания приводит к более экономичным решениям и, следовательно, к уменьшению трудозатрат и материалов на возведение конструкций. Кроме того, разработка более простых методов расчета позволит уменьшить сроки проектирования этих конструкций и, таким образом, снизить удельный вес проектных работ. Практикой продиктована необходимость дальнейшего поиска путей создания на базе разрозненных методов расчета и отдельных расчетных предположений единого методологически действенного инструмента исследования основных аспектов геомеханического поведения основания в зоне его взаимодействия с различными морскими сооружениями.

Таким образом, в связи с вышеизложенными обстоятельствами остаются актуальными вопросы дальнейшего изучения взаимодействия конструкций и фундаментов морских сооружений с грунтовым основанием с учетом анизотропных и реологических свойств и других особенностей

последнего. Разработка и обоснование такой методологии расчета представляет собой решение крупной научной проблемы, имеющей важное значение.

Теоретическая основа метода исследования (The theoretical basis of the research method)

Рассмотрим расчетную схему системы «подпорная стена – фундаментная плита – анизотропное основание» с действующими вертикальными постоянными усилиями по продольной оси протяженной плиты (рис. 1). Предполагается, что стена и фундаментная плита жестко и непрерывно сцеплены по всей контактной поверхности с упругим основанием. Изучается напряженное и деформированное состояние сложной анизотропной системы от действия вертикальных усилий на поверхность фундаментной плиты. Вычисления выполнены методом конечных элементов с привлечением плоских восьмиузловых изопараметрических расчетных элементов. Для этого рассматривается плоскость поперечного сечения изучаемого объекта, которая моделируется невесомым анизотропным полем, находящимся в условиях обобщенной плоской деформации при следующих граничных условиях:

– на верхней негладкой границе l действуют нормальные усилия:

$$\sigma_z = P(x), \quad \tau_{yz} = \tau_{xz} = \tau_{xy} = 0; \quad (1)$$

– подпорная стена и фундаментная плита жестко и непрерывно сцеплены с анизотропным основанием:

$$\sigma_n^n = \sigma_n, \quad \tau_{yz}^B = \tau_{yz}, \quad \tau_{xz}^n = \tau_{xz}, \quad \tau_{xy}^n = \tau_{xy}, \quad u^n = u, \quad w^n = w, \quad v^n = v; \quad (2)$$

– боковые границы AE и DF и нижняя граница EF от действия вертикальных усилий $P(x)$ на плите не деформируются:

$$u = w = v = 0 \quad \text{при} \quad -\infty < E < \infty, \quad -H \leq z \leq H. \quad (3)$$

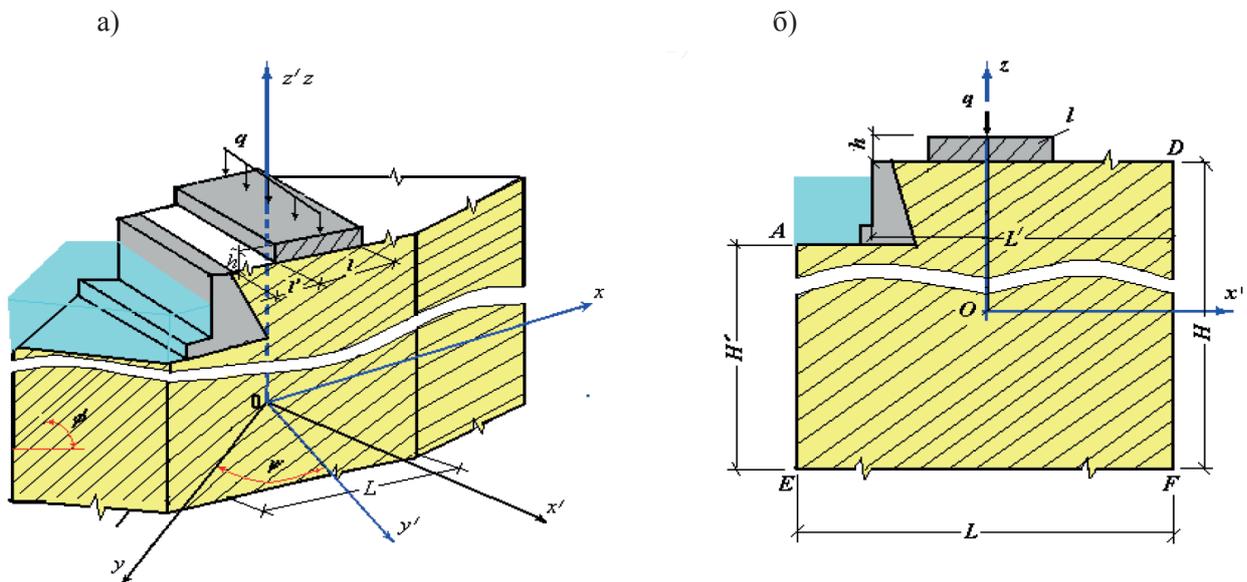


Рис. 1. Расчетная схема упругой системы «подпорная стена — фундаментная плита — анизотропное основание»: а — общий вид системы; б — расчетная плоскость поперечного сечения

В соответствии с методом конечных элементов [5] расчетная область размерами $80,0 \times 40,30$ м с подпорной стеной и фундаментной плитой разбивается с помощью 735 узлов на 224 восьмиузловых изопараметрических элемента.

Не нарушая общности постановки задач, в качестве упругих постоянных для материалов подпорной стены и фундаментной плиты взяты соответствующие характеристики, близкие для изотропного тела, т. е.

$$E_k^n = E, \nu_k^n = \nu \text{ и } G_2^n = G^n = E_1^n / 2(1 + \nu_1^n) \quad (k = 1, 2). \quad (4)$$

Углы наклона плоскости изотропии φ и отклонения продольной оси подпорной стены и фундаментной плиты $\psi^{\text{ПС}} = \psi^{\text{ПЛ}}$ от линии простираения плоскости изотропии основания изменяются от нуля до π со следующими шагами: $\Delta\varphi = \pi/6$ и $\Delta\psi = \pi/6$. При дискретизации подобласть поперечного сечения подпорной стены и фундаментной плиты разбита на 20 и 12 изопараметрических элементов соответственно.

Заданы следующие граничные условия: боковые стороны и основания недеформируемы, т. е. в них проекции перемещений $u = v = w = 0$, нижняя и правая боковая границы подпорной стены, а также нижняя граница плиты жестко и непрерывно сцеплены, т. е. выполняется условие жесткого контакта. На верхней границе фундаментной плиты в общем случае действуют вертикальные постоянные нагрузки $P(x)$, зависящие от координаты x , и они обычным образом приводятся к узлам; остальная часть верхней и боковой границы области свободна от действия напряжений.

Результаты (Results)

Для проверки правильности действия разработанного алгоритма и составленной программы по расчету упругого напряженного и деформированного состояния системы предварительно решен ряд тестовых задач изотропной полуплоскости с упругими характеристиками: $E = 1 \times 10^6$ МПа, $\nu = 0,2$, находящейся под действием вертикальной сосредоточенной нагрузки P на верхней границе, т. е. в точке O (рис. 2).

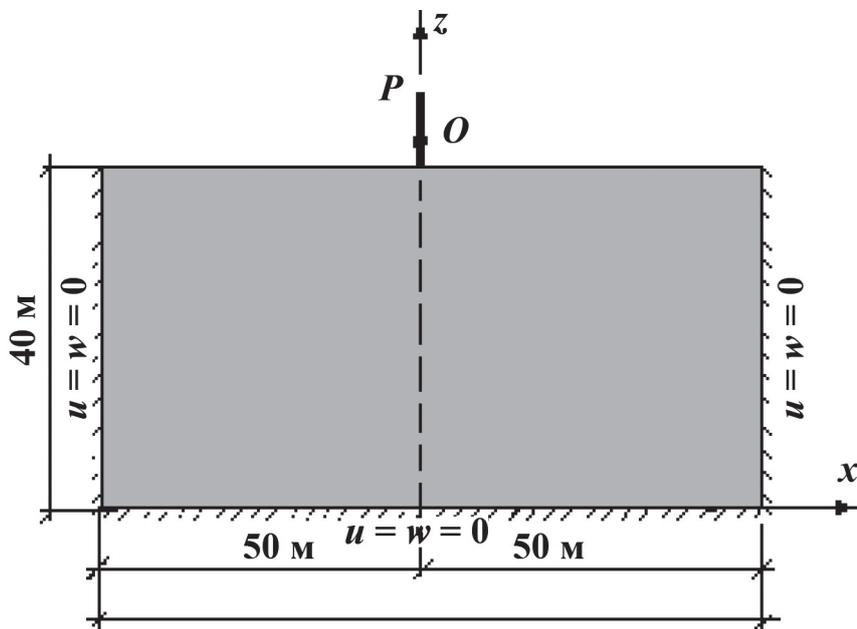


Рис. 2. Изотропная полуплоскость под действием вертикальной нагрузки P

Размеры расчетной области: высота 40 м, длина по основанию 100 м, и граничные условия задач показаны на рис. 2, они выбраны таким образом, чтобы исключить влияние граничных условий. Расчетная область разбита на 208 конечных элемента с помощью 685 узлов со сгущением сетки разбивки в подобласти наземного сооружения и вблизи нее. Система алгебраических уравнений решалась методом Гаусса. Результаты расчетов для тяжелой полуплоскости с удельным весом $2,5 \text{ т/м}^3$ приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Сравнение значений напряжений σ
в разных точках изотропной полуплоскости от действия собственного веса**

Глубина $H - h = z$, м	0,06	0,09	0,22	0,41	0,64	0,93	1,26	1,64	2,01
$\sigma_z / \gamma H$ (аналитический метод)	0,01	0,02	0,06	0,10	0,16	0,23	0,31	0,41	0,52
σ_z (метод конечных элементов)	0,01	0,02	0,06	0,11	0,16	0,23	0,31	0,41	0,52

Решена также статическая задача для полуплоскости с фундаментной плитой размерами $1,0 \times 0,4$ м, находящейся под действием единичной вертикальной нагрузки P при аналогичных физико-механических свойствах материала для плиты и полуплоскости. В табл. 2 приведены значения напряжений σ в разных точках полуплоскости с плитой. Сравнительный анализ полученных результатов по МКЭ и аналитическим методом показывает их удовлетворительную сходимость.

Таблица 2

Сравнение значений напряжений σ_z

Глубина $H - h = z$, м	0,06	0,12	0,24	0,46	0,68	1,02	1,24	1,36	1,81	2,25	2,81	3,36
$\sigma_z, \pi z / 2P$ (аналитический метод)	0,99	0,54	0,27	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02
$\sigma_z, \pi z / 2P$ (метод конечных элементов)	0,99	0,55	0,29	0,16	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02

Таким образом, сравнительный анализ полученных результатов тестовых задач показывает достоверность разработанных алгоритмов и составленных пакетов прикладных программ.

В табл. 3 приведены значения параметров, необходимых для дальнейших расчетов.

Таблица 3

**Физико-механические характеристики основания
и материала фундаментной плиты и подпорной стены**

Тип	Наименование типов	Физико-механические характеристики						Наименование материалов
		E_1 , 10^4 МПа	E_2 , 10^4 МПа	G_2 , 10^4 МПа	ν_1	ν_2	γ , т/м ³	
1	Основание [6]	1,074	0,523	0,12	0,413	0,198	2,6	Алевролит
2	Основание [6]	1,074	0,523	0,20	0,29	0,125	2,7	Известняк
3	Фундаментная плита [7]	2,5	2,5	G	0,3	0,3	2,8	Железобетон
4	Штамп [8]	50,0	50,0	G	0,3	0,3	2,8	Железобетон
5	Подпорная стена [9]	2,5	2,5	G	0,3	0,3	2,8	Железобетон

На рис. 3 и 4 показаны эпюры упругих перемещений, в табл. 4 приведены значения упругих перемещений w и u на границе изучаемых объектов при плоской ($\psi = 0$) и обобщенной плоской деформации ($\psi \neq 0$). Видно, что величина угла падения плоскости изотропии оказывает существенное влияние на характер распределения перемещений: с ростом угла падения плоскости изотропии ϕ вертикальные перемещения на краях плиты значительно уменьшаются. При любом угле падения плоскости изотропии анизотропного основания величина перемещения значительно больше (почти в три раза при $\phi = \psi = 0$), чем при соответствующих перемещениях в изотропном упругом основании (см. рис. 3 пунктирные линии).

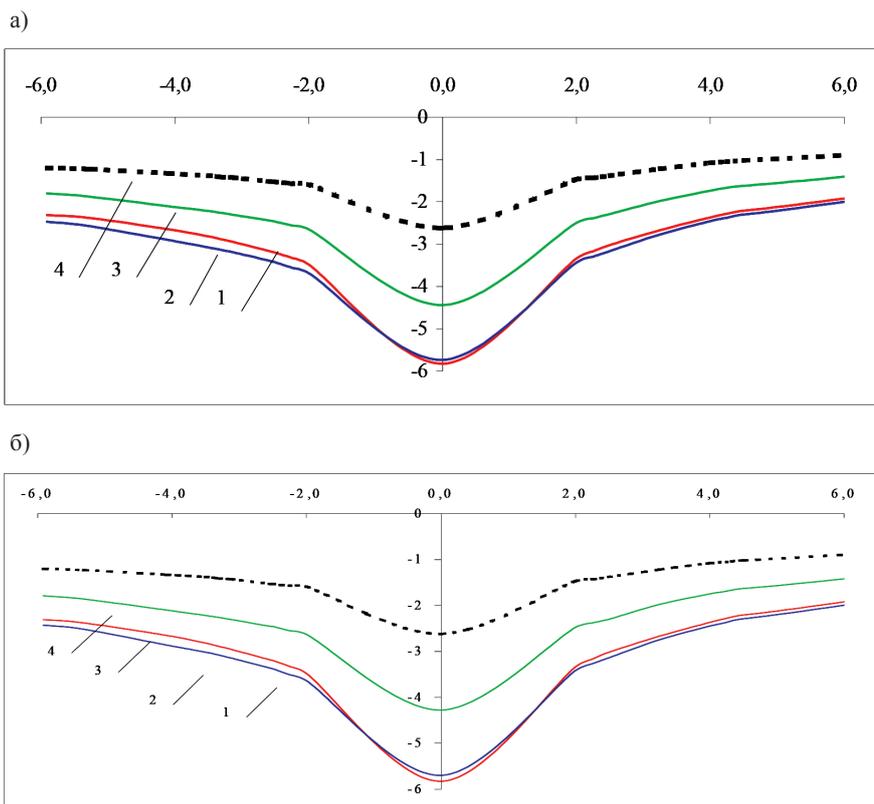


Рис. 3. Эпюры упругих перемещений w ($10^4/Pl$) на левой границе подпорной стены:
 а — при угле $\psi = 0^\circ$; б — при угле $\psi = 30^\circ$
 Условные обозначения: 1 — $\varphi = 0^\circ$; 2 — $\varphi = 30^\circ$; 3 — $\varphi = 60^\circ$; 4 — изотропный случай

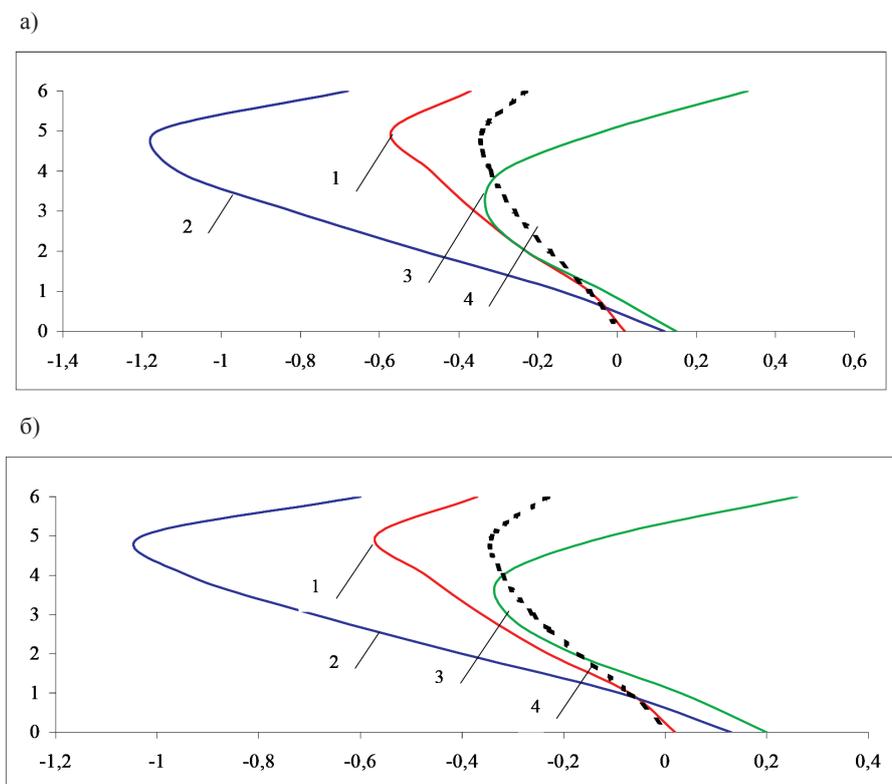


Рис. 4. Эпюры горизонтальных упругих перемещений u ($10^4/Pl$) на левой границе подпорной стены:
 а — при угле $\psi = 0^\circ$; б — при угле $\psi = 30^\circ$
 Условные обозначения: 1 — $\varphi = 0^\circ$; 2 — $\varphi = 30^\circ$; 3 — $\varphi = 60^\circ$; 4 — изотропный случай

Таблица 4

**Значения перемещений u ($10^4/Pl$) и w ($10^4/Pl$) на границе анизотропной системы
«подпорная стена – фундаментная плита – основание»**

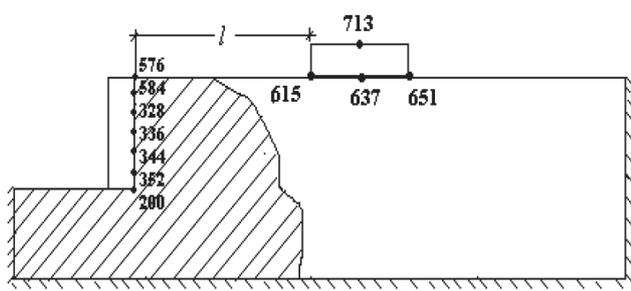
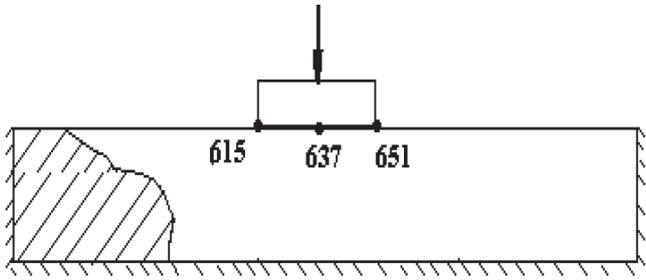
Номер узла							
	$\psi = 0$			$\psi = 30^\circ$			$\psi = 90^\circ$
	$\varphi = 0$	$\varphi = 30^\circ$	$\varphi = 60^\circ$	$\varphi = 30^\circ$	$\varphi = 60^\circ$	$\varphi = 90^\circ$	$\varphi = 90^\circ$
Перемещения u ($10^4/Pl$)							
576	-0,37	-0,68	0,33	-0,60	0,26	-0,22	-0,23
584	-0,57	-1,16	-0,03	-1,03	-0,11	-0,38	-0,34
328	-0,47	-1,11	-0,29	-0,94	-0,32	-0,38	-0,32
336	-0,36	-0,82	-0,33	-0,69	-0,31	-0,32	-0,26
344	-0,23	-0,49	-0,23	-0,40	-0,18	-0,22	-0,17
352	-0,07	-0,14	-0,03	-0,09	0,03	-0,11	-0,07
200	0,02	0,12	0,15	0,13	0,20	-0,04	0,01
Перемещения w ($10^4/Pl$)							
576	-2,38	-2,57	-1,87	-2,52	-1,86	-1,25	-1,23
584	-2,34	-2,56	-1,87	-2,50	-1,85	-1,25	-1,22
328	-2,25	-2,41	-1,86	-2,36	-1,83	-1,21	-1,18
336	-2,15	-2,24	-1,82	-2,21	-1,77	-1,17	-1,12
344	-2,05	-2,06	-1,72	-2,04	-1,66	-1,11	-1,04
352	-1,95	-1,90	-1,60	-1,89	-1,53	-1,04	-0,95
200	-1,91	-1,82	-1,53	-1,81	-1,46	-1,01	-0,88

Таблица 5

**Значения нормальных σ/P и касательных τ/P напряжений
на границе анизотропной системы «фундаментная плита – основание»**

Углы наклона плоскости изотропии и отклонения							
		615		637		651	
ψ	φ	σ_x	σ_z	σ_x	σ_z	σ_x	σ_z
0	0	-0,475	-0,700	-0,143	-0,446	-0,168	-0,469
Значения нормальных напряжений σ/P							

30°	0°	-0,525	-0,748	-0,236	-0,379	-0,424	-0,727
	30°	-0,521	-0,743	-0,226	-0,387	-0,407	-0,725
	45°	-0,521	-0,736	-0,216	-0,398	-0,405	-0,720
	60°	-0,519	-0,725	-0,206	-0,413	-0,422	-0,714
	90°	-0,485	-0,702	-0,193	-0,430	-0,492	-0,713
45°	0°	-0,432	-0,727	-0,202	-0,349	-0,551	-0,787
	30°	-0,440	-0,727	-0,201	-0,363	-0,504	-0,772
	45°	-0,456	-0,725	-0,201	-0,378	-0,468	-0,754
	60°	-0,471	-0,721	-0,199	-0,395	-0,454	-0,736
	90°	-0,468	-0,706	-0,194	-0,416	-0,475	-0,718
60°	0°	-0,285	-0,700	-0,177	-0,362	-0,533	-0,853
	30°	-0,327	-0,699	-0,176	-0,381	-0,492	-0,808
	45°	-0,370	-0,703	-0,180	-0,390	-0,463	-0,775
	60°	-0,409	-0,708	-0,185	-0,398	-0,449	-0,749
	90°	-0,443	-0,711	-0,189	-0,410	-0,450	-0,723
90°	0°	-0,191	-0,686	-0,063	-0,475	-0,193	-0,193
	30°	-0,227	-0,710	-0,090	-0,437	-0,230	-0,722
	45°	-0,277	-0,715	-0,118	-0,421	-0,281	-0,727
	60°	-0,336	-0,336	-0,146	-0,413	-0,340	-0,728
	90°	-0,399	-0,713	-0,173	-0,410	-0,405	-0,726

Значения касательных напряжений τ/P

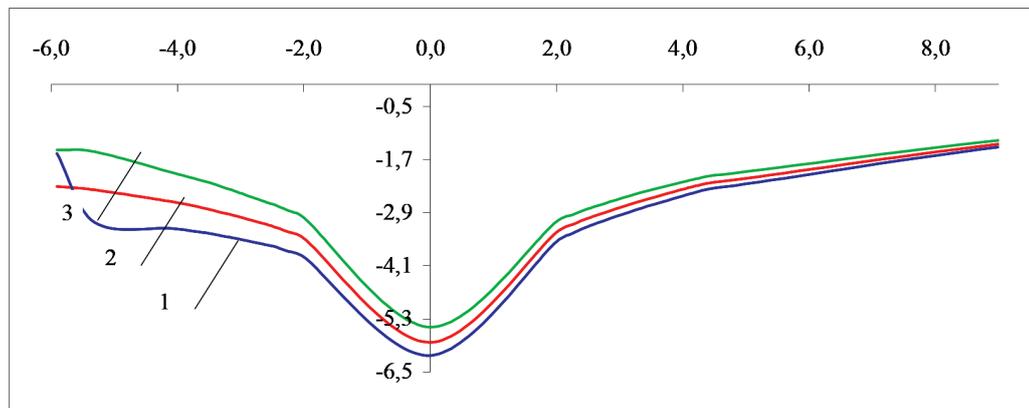
Φ	Ψ	τ_{xz}	τ_{yz}	τ_{xy}	τ_{xz}	τ_{yz}	τ_{xy}	τ_{xz}	τ_{yz}	τ_{xy}
30°	0°	0,000	-0,179	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,047	0,000
	30°	0,000	-0,158	0,000	0,000	-0,010	0,000	0,000	0,231	0,000
	45°	-0,010	-0,158	-0,027	0,004	-0,008	-0,022	0,014	0,228	-0,031
	60°	-0,002	-0,160	-0,029	0,004	-0,007	-0,029	0,016	0,224	-0,012
	90°	0,001	-0,166	-0,034	0,004	-0,005	-0,027	0,017	0,218	0,019
45°	0°	0,020	-0,190	-0,048	0,006	0,000	0,000	0,019	0,199	0,053
	30°	0,000	-0,191	0,000	0,000	0,014	0,000	0,000	0,167	0,000
	45°	-0,010	-0,176	-0,001	0,002	0,005	-0,018	-0,007	0,181	-0,049
	60°	0,007	-0,170	0,001	0,000	-0,001	-0,021	-0,011	0,196	-0,032
	90°	0,021	-0,173	-0,006	0,001	-0,003	-0,020	-0,736	0,206	0,000
60°	0°	0,014	-0,194	-0,027	0,007	0,000	0,000	0,014	0,203	0,032
	30°	0,000	-0,189	0,000	0,000	0,025	0,000	0,000	0,097	0,000
	45°	0,023	0,023	0,050	-0,009	0,015	-0,004	-0,808	-0,808	-0,018
	60°	0,038	-0,173	0,054	-0,005	0,007	-0,001	-0,051	0,161	-0,004
	90°	0,041	-0,177	0,041	-0,002	0,002	-0,001	-0,040	0,186	0,186
90°	0°	0,007	-0,190	-0,004	0,004	0,000	0,000	0,007	0,199	0,008
	30°	0,000	-0,133	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,138	0,000
	45°	0,052	-0,145	0,094	0,000	0,000	0,057	-0,055	-0,055	0,096
	60°	0,067	-0,160	0,123	0,000	0,000	0,063	-0,070	0,168	0,125
	90°	-0,346	-0,336	-0,336	0,000	0,000	0,053	-0,059	0,181	0,181

В табл. 5 и 6 и на рис. 5 приведены значения напряжений в точках контактной поверхности. Анализ содержания таблиц показывает влияние на значения напряжений степени упругой анизотропии основания и величины углов φ и ψ . Рост угла отклонения продольной оси плиты от линии простирания плоскости изотропии ψ не меняет общего характера распределения перемещений, но степень их асимметрии относительно вертикальной оси z уменьшается.

В случае, если $\varphi = \psi = \pi/2$ значения перемещений в анизотропной полуплоскости совпадают со значениями в изотропной полуплоскости. С ростом угла отклонения ψ при постоянном значении угла падения плоскости изотропии φ величины вертикальных перемещений w уменьшаются.

С увеличением жесткости упругой плиты (рис. 5) и угла наклона плоскости изотропии φ на границе контакта системы величины вертикальных перемещений w уменьшаются и наблюдается асимметрия, которая сохраняется и при увеличении угла ψ . С уменьшением деформативности материала плиты наибольшие перемещения наблюдаются в середине, такая тенденция в характере их распределения наблюдается при любых значениях углов φ и ψ . Жесткостные характеристики материала фундаментной плиты сказываются на упругом напряженном состоянии анизотропного основания.

а)



б)

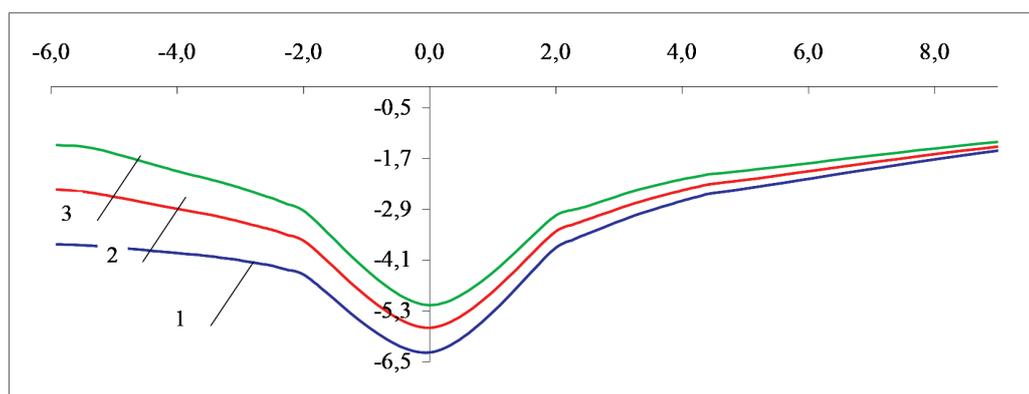


Рис. 5. Эпюры вертикальных упругих перемещений $w(10^4/Pl)$ подпорной стены:

a — при углах $\psi = 0, \varphi = 0$; *б* — при углах $\psi = 30^\circ, \varphi = 30^\circ$

Условные обозначения: 1 — гибкая фундаментная плита;

2 — упругая фундаментная плита; 3 — штамп

Расстояние между плитой и подпорной стеной оказывает существенное влияние на осадку фундамента, что подтверждает проведенный численный эксперимент. На рис. 6 показано взаимовлияние плиты и подпорной стенки: при уменьшении расстояния до 8 м наблюдается увеличение осадки фундаментной плиты в сторону подпорной стены.

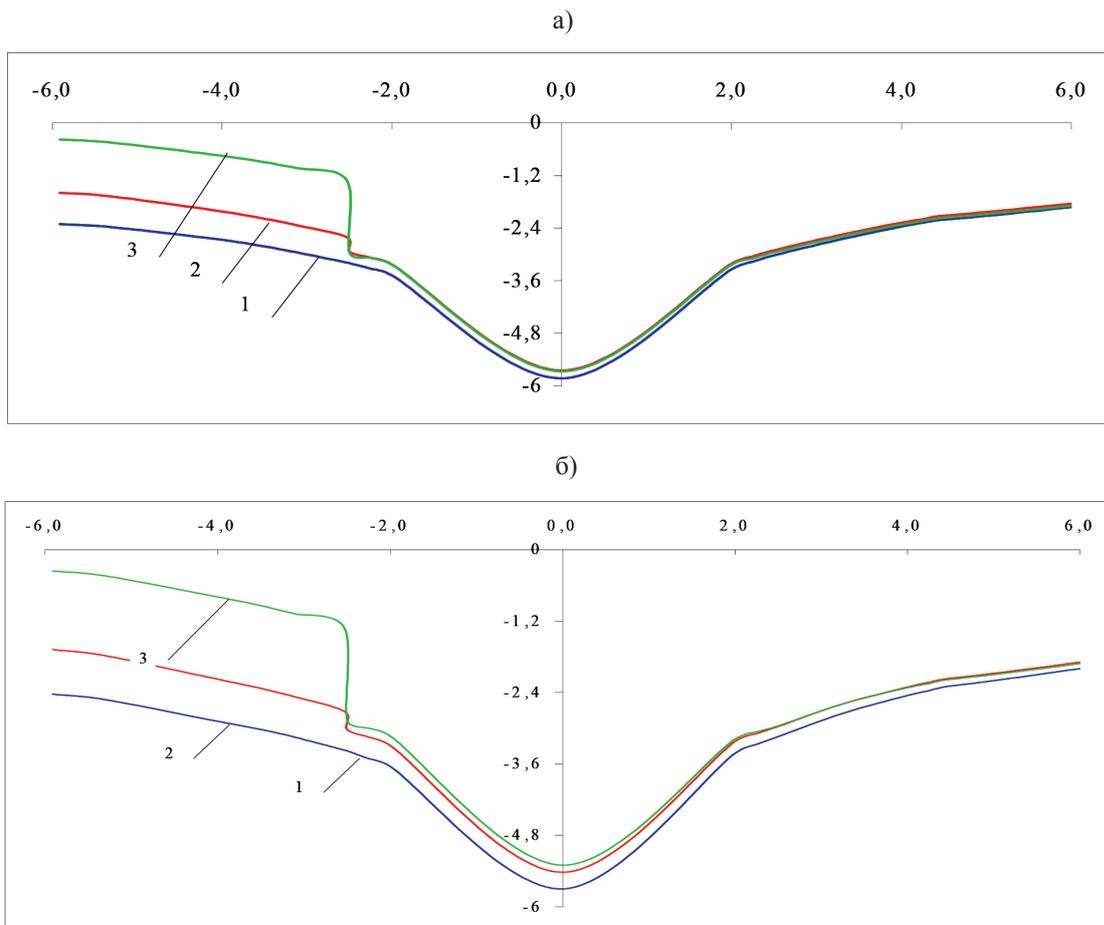


Рис. 6. Эпюры вертикальных упругих перемещений w ($10^4/Pl$) на границе анизотропной системы «подпорная стена — фундаментная плита — основание»: а — при углах $\psi = 0$, $\varphi = 0$; б — при углах $\psi = 30^\circ$, $\varphi = 30^\circ$
 Условные обозначения: 1 — $l = 1,0$ м; 2 — $l = 3,5$ м; 3 — $l = 9,0$ м (l — расстояние от фундаментной плиты до подпорной стены)

Таблица 6

Значения напряжений σ_z / P на границе анизотропной системы «подпорная стена – фундаментная плита – основание»

Номер узла							
	$\psi = 0$			$\psi = 30^\circ$			$\psi = 90$
	$\varphi = 0$	$\varphi = 30^\circ$	$\varphi = 60^\circ$	$\varphi = 30^\circ$	$\varphi = 60^\circ$	$\varphi = 90^\circ$	$\varphi = 90^\circ$
576	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
584	-0,01	-0,01	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00
328	-0,03	-0,05	-0,01	-0,05	-0,02	-0,01	-0,02
336	-0,03	-0,05	-0,03	-0,05	-0,03	-0,02	-0,03
344	-0,04	-0,05	-0,04	-0,05	-0,04	-0,02	-0,03
352	-0,03	-0,05	-0,04	-0,04	-0,04	-0,02	-0,04
200	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,01	-0,02

Обсуждение (Discussion)

Анализ напряженно-деформированного состояния наземных и подземных сооружений указывает на преимущественное применение однородной изотропной модели массива, которая, адекватно отражая реальные свойства массива в целом, в осредненном смысле не позволяет в расчетных схемах отражать такие существенные характеристики породной толщи, как складчатость, слоистость, трещиноватость и самое главное — разную ориентацию продольных осей протяженных (бесконечных) сооружений по отношению к поверхности напластования слоев. В зависимости от ориентации продольных осей бесконечные и полубесконечные полосы, плиты и конструкции причалов морского порта находятся в разных условиях деформации. Например, если продольная ось бесконечных полос совпадает с направлением линии простирания слоев, то можно его рассматривать как плоское деформированное состояние, в случае нормального их пересечения — как обобщенную плоскую деформацию при диагональном простирании оси полосы, занимающем промежуточное положение между первым и вторым случаями.

В существующих работах расчетные схемы разноориентированных продольных осей конструкций по отношению к линии простирания слоев принимаются одинаковыми (не учитываются), хотя, как отмечалось ранее, они находятся в принципиально разных условиях деформации.

Реальный массив и слагающие его породы обладают в целом рядом физических свойств и структурно-механических особенностей. Причем эти свойства и особенности многообразны до бесконечности и, как правило, очень слабо детерминированы. Отмеченным, очевидно, и объясняется модельный подход, широко используемый при рассмотрении напряженно-деформированного состояния массива и решении практических контактных задач.

Рассматривая возможный выбор модели, не следует выпускать из поля зрения двойственный характер предъявляемых к ней основных требований. С одной стороны, модель должна наиболее адекватно отражать реальные свойства массива и охватывать широкий круг встречающихся породных явлений, т. е. расчетные положения на базе принятой модели должны отражаться практической достоверностью и известной универсальностью. С другой стороны, модель массива должна позволять при построении и реализации расчетных положений получать в удобном виде конкретные практические результаты [10].

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- экспериментальные исследования физико-механических характеристик и упругих, реологических свойств горных пород морского шельфа и Прикаспийского региона;
- создание физико-механической модели упругого анизотропного наклонно-слоистого основания;
- определение методов решения поставленной задачи, его обоснование, апробирование и определение границ применимости, внедрение результатов;
- приложение разработанной методологии к оценке напряженно-деформированного состояния конструкций морского порта, морских буровых платформ и других гидротехнических сооружений.

Современный этап развития механики грунтов характеризуется активным переходом к новым расчетным моделям, отражающим с максимальной полнотой разнообразные реальные свойства грунтов и горных пород. Основной проблемой механики анизотропных грунтов и горных пород остается построение математической модели, адекватно описывающей процессы их деформирования и разрушения.

Выводы (Summary)

1. Рассмотрена статическая задача об упругом напряженном и деформированном состоянии анизотропных систем «подпорная стена – фундаментная плита – основание» от действий постоянных вертикальных нагрузок по продольной длине плиты в условиях обобщенной плоской деформации.

2. С целью установления размеров расчетной области, количества расчетных элементов и проверки достоверности составленных программ решены тестовые задачи и выполнено сравнение значений напряжения σ_z изотропной полуплоскости при действии вертикальной сосредоточенной силы P и собственного веса, определенных аналитическим методом и методом конечных элементов.

3. Разработан алгоритм и пакет прикладных программ, на основе которых в результате многовариантных расчетов выявлены закономерности распределения перемещений и напряжений в упругой анизотропной системе «подпорная стена – фундаментная плита – основание» в условиях обобщенной плоской деформации, исследовано влияние угла наклона плоскости изотропии относительно горизонтальной оси и угла отклонения продольной оси сооружения от линии простирания слоев основания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлинов М. В. Основания и фундаменты / М. В. Берлинов. — Лань, 2011. — 320 с.
2. Болдырев Г. Г. Механика грунтов. Основания и фундаменты / Г. Г. Болдырев. — Пенза: ПГУАС, 2009. — 412 с.
3. Мори В. Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти / В. Мори, Д. Фурментро. — М.: Мир, 1994. — 416 с.
4. Айталиев Ш. М. Проблемы устойчивого функционирования инженерных сооружений на шельфе Казахстанского шельфа Каспия / Ш. М. Айталиев, Ж. К. Масанов, Е. Т. Божанов, И. Н. Дюсембаев // III Ассамблея Ассоциации университетов Прикаспийских государств: тез. докл. — Актау: Казахстан, 1998. — С. 45–49.
5. Трушин С. И. Метод конечных элементов. Теория и задачи / С. И. Трушин. — М.: Изд-во АСВ, 2008. — 256 с.
6. Davenport A. G. Gust loading factors / A. G. Davenport // Journal of the Structural Division. — 1967. — Vol. 93. — Is. 3. — Pp. 11–34.
7. Барнштейн М. Ф. Расчет пространственных глубоководных сооружений на волновые, ветровые и сейсмические воздействия / М. Ф. Барнштейн // Строительная механика и расчет сооружений. — 1982. — № 1. — С. 47–54.
8. Халфин И. Ш. Морские нефтепромысловые гидротехнические сооружения и волновые воздействия на них / И. Ш. Халфин. — М.: Судостроение, 1979.
9. Масанов Ж. К. Об одном алгоритме построения матрицы жесткости системы метода конечных элементов для трехмерной теории упругости / Ж. К. Масанов, И. Б. Баймаханов // Известия АН Каз. ССР. Серия физико-математических наук. — 1977. — № 3. — С. 24–31.
10. Suleimenov T. Road design by taking into account analysis of stress-strain state of bare boards / T. Suleimenov, T. Sultanov, G. Tlepiyeva, Y. Sovet // New Trends in Process Control and Production Management. — London, UK: Taylor & Francis Group, 2018. — Pp. 497–507.

REFERENCES

1. Berlinov, M.V. *Osnovaniya i fundamenti*. Lan', 2011.
2. Boldyrev, G.G. *Mekhanika gruntov. Osnovaniya i fundamenti*. Penza: PGUAS, 2009.
3. Mori, V., and D. Furmentro. *Mekhanika gornyykh porod primenitel'no k problemam razvedki i dobychi nefi*. M.: Mir, 1994.
4. Aitaliev, Sh.M., Zh.K. Masanov, E.T. Bozhanov, and I.N. Dyusembaev. "Problemy ustoichivogo funkcionirovaniya inzhenernykh sooruzhenii na shel'fe Kazakhstanskogo shel'fa Kaspiya." *III Assambleya Assotsiatsii universitetov Prikaspiiskikh gosudarstv: Tezisy dokl.* Aktau: Kazakhstan, 1998: 45–49.
5. Trushin, S.I. *Metod konechnyykh elementov. Teoriya i zadachi*. Moskva: Izd-vo ASV, 2008.
6. Davenport, Alan G. "Gust loading factors." *Journal of the Structural Division* 93.3 (1967): 11–34.
7. Barnshtein, M.F. "Raschet prostranstvennykh glubokovodnykh sooruzhenii na volnovye, vetrovye i seismicheskie vozdeistviya." *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii* 1 (1982): 47–54.
8. Khalfin, I.Sh. *Morskie neftepromyslovye gidrotekhnicheskie sooruzheniya i volnovye vozdeistviya na nikh*. M.: «Sudostroenie», 1979.

9. Masanov, Zh.K., and I.B. Baimakhanov. "Ob odnom algoritme postroeniya matritsy zhestkosti sistemy metoda konechnykh elementov dlya trekhmernoi teorii uprugosti." *Izvestiya AN Kaz.SSR. Seriya fiziko-matematicheskikh nauk* 3 (1977): 24–31.

10. Suleimenov, T., T. Sultanov, G. Tlepiyeva, and Y. Sovet. "Road design by taking into account analysis of stress-strain state of bare boards." *New Trends in Process Control and Production Management*. London, UK: Taylor & Francis Group, 2018: 497–507.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Султанов Тимур Тулеугалиевич —
кандидат технических наук, доцент
Евразийский национальный университет
имени Л. Н. Гумилева
010000, Республика Казахстан, Астана,
ул. Сатпаева, 3
e-mail: rumit78@mail.ru

Тлепиева Гульнар Муратовна —
кандидат технических наук, доцент
Евразийский национальный университет
имени Л. Н. Гумилева
010000, Республика Казахстан, Астана, ул.
Сатпаева, 3
e-mail: tlepiyevagm@yandexl.ru

Саттарова Шолпан Шайзадовна —
преподаватель
Евразийский национальный университет
имени Л. Н. Гумилева
010000, Республика Казахстан, Астана, ул.
Сатпаева, 3
e-mail: sholpan_09.94@mail.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

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

Sattarova, Sholpan Sh. —
Lecturer
Eurasian National University named
after L.N. Gumilev
3 Satpaev Str., Astana, 010000,
Republic of Kazakhstan
e-mail: sholpan_09.94@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 16 ноября 2017 г.
Received: November 16, 2017.*