

МРНТИ 52.47.21

Д.У. Сугиров | ©



Д-р техн. наук, профессор

ORCID

<https://orcid.org/0000-0002-8109-1658>

Каспийский университет технологий и инжиниринга им. Ш. Есенова



г. Актау, Казахстан

[sugirov-56@mail.ru](mailto:sugirov-56@mail.ru)

## СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СИСТЕМ ЗАЯКОРЕНИЯ МОРСКИХ ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

**Аннотация.** В статье представлены результаты расчета систем заякорения морских буровых платформ в плоской и пространственной постановке. Якорные связи (цепи, тросы) рассматриваются как гибкие, тяжелые и нерастяжимые нити, провисающие по цепной линии. Расчетные схемы якорных закреплений представлены в виде одностороннего, либо двустороннего заякорения. В основе статических расчетов были приняты следующие допущения: якорь – это неподвижная плита самого нижнего кончика цепи; под действием горизонтальной составляющей наружных статических сил имеющиеся клюзовые опоры цепей передвигаются исключительно в горизонтальном пространстве; величина горизонтальных составляющих внешних нагрузок принята равной разности величины распоров в рабочем и начальном состоянии. Установлено, что все значения статических перемещений якорных цепей зависят только от угла наклона цепей относительно дна. Перемещение буровой платформы зависят от величин действующих внешних нагрузок.

**Ключевые слова:** морские плавучие системы, буровые платформы, системы заякорения, статический расчет, перемещения.



Сугиров, Д.У. Статический расчет систем заякорения морских плавучих сооружений [Текст] / Д.У. Сугиров // Механика и технологии / Научный журнал. – 2021. – №3(73). – С.39-44.

**Введение.** Для удержания плавучих объектов в заданном положении в условиях ветроволновых воздействий у плавучих сооружений используют разные системы заякорения. На практике в настоящее время наибольшим распространением получили системы цепных заякорений с одиночными подвешанными массивами и на провисающих цепях [1].

В общем случае расчет систем заякорения морских буровых платформ сводится к решению задачи в статической и динамической постановке.

**Условия и методы исследований.** Расчет систем заякорения выполняется в плоской и пространственной постановке. При этом якорные связи (цепи, тросы) рассматриваются как гибкие, тяжелые и нерастяжимые нити, провисающие по цепной линии, а расчетные схемы якорных закреплений могут быть представлены либо в виде одностороннего, либо двустороннего заякорения.

В расчетном отношении различаются первоначальные и рабочие состояния систем заякорения. Под первоначальным состоянием понимается

состояние систем заякорения до прикладывания внешних сил, а под рабочим состоянием принимают состояние, когда на заякоренную платформу будет действовать внешняя сила.

Наиболее общая расчетная система якорных закреплений - это система несимметричного двустороннего заякорения, для которой цепи обоих бортов в первоначальном состоянии имеют различные значения элементов заякорения (рис. 1) [2].

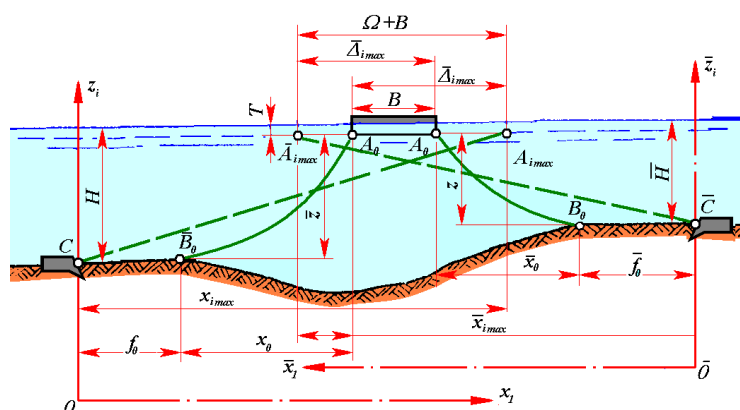


Рис. 1. Общая схема двустороннего заякорения на провисающих цепях

В основе статических расчетов были приняты следующие допущения: якорь – это неподвижная плита самого нижнего кончика цепи; под действием горизонтальной составляющей наружных статических сил имеющиеся ключевые опоры цепей передвигаются исключительно в горизонтальном пространстве; а величина горизонтальных составляющих внешних нагрузок принята равной разности величины распоров в рабочем и начальном состоянии. Установлено, что все значения статических перемещений якорных цепей зависят только от угла наклона цепей относительно дна. Перемещение буровой платформы зависит от величин действующих внешних нагрузок.

Исходными данными для расчета являются:

$q$  - вес единицы длины цепи в воде, тс/м;

$Z$  - вертикальная проекция свободно провисающей цепи, м;

$S_{кр}$  - полная длина цепи, м.

В результате расчета определяются значения:

$F_i$  - полное усилие в цепи в ключевой точке, тс;

$F_{xi}$  - составляющая усилия в цепи, тс;

$V_{yi}$  - величина вертикальной составляющей усилия в опоре С, тс;

$F_{yi}$  - полное усилие в анкерной опоре С, тс;

$\Delta_i$  - горизонтальное перемещение плавучего объекта по направлению действия внешних сил, м.

Нагрузки, которые действуют на плавающий морской объект, не имеют постоянства их значений, и соответственно, меняется и значение усилия натяжения канатов. Плавающее тело морского объекта будет стремиться изменять свое положение в соответствии с изменениями действующих на объект нагрузок. Для полной иллюстрации данного

процесса на рисунке 2 отображена схема возможных перемещений объекта [3].

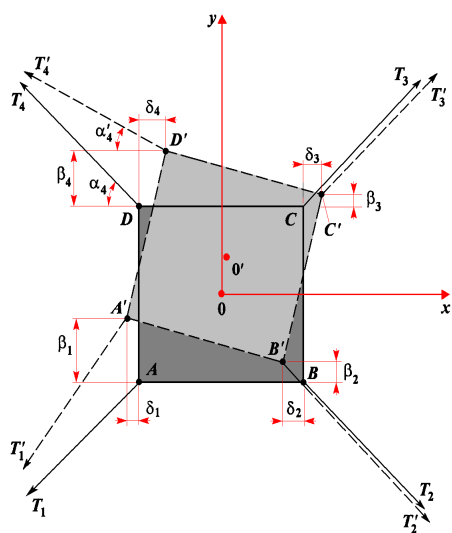


Рис. 2. Схема возможных перемещений плавящего МНГС, закрепленного якорями

На схеме начальное положение морского объекта обозначено сплошными линиями, а измененные – пунктирами. Все начальные значения измененных параметров якорных цепей обозначены цифрами 1, 2, 3 и 4; а измененные параметры обозначены теми же символами, но со штрихом. Как видно из схемы, опорные точки  $A, B, C, D$  занимают положение  $A', B', C', D'$ . А величина горизонтального перемещения опорных точек обозначены в направлениях оси  $x - \delta$ , а в направлении оси  $y - \beta$ . При этом перемещения изменяют не только положение опорных точек, но и имеющиеся усилия в канатах. Реально платформа будет иметь перемещения в объемном

трехмерном пространстве, что существенно будет усложнять управление объектом.

Породный массив рассматривается как однородное упругое тело с плоскостью изотропии, совпадающей параллельным слоям. Уравнение состояния таких массивов описывается согласно [4].

Если рассмотреть слоистый трансстропный массив, лежащий под некоторым углом  $\varphi$  к горизонту, а продольные оси плит составляет с линией простираения наклонной плоскости изотропии массива угол  $\psi$ , то вышеприведенная система является описанием трансстропного массива без учета угла наклона этого массива к горизонту. Производим поворот координатных осей на некоторый угол  $\varphi$  относительно оси  $Oy$ , таким образом, чтобы ось  $Oz$  была направлена строго вертикально. На основе таблицы направляющих косинусов составляем таблицу преобразования коэффициентов согласно [4] и, используя формулы преобразования, находим уравнения закона Гука в новых координатах.

Рассматриваемую область исследования мысленно будем делить на множество прямоугольных параллелепипедов, контактирующих между собой в узлах. Для данного исследуемого конечного элемента аппроксимирующую функцию будем вводить из условия, что все перемещения будут распределяться по линейным законам и не будут зависеть друг от друга [5].

**Результаты исследований.** При расчетах массивных тел в МКЭ были использованы зависимости для трехмерных напряженных состояний. Система линейных алгебраических уравнений имеет вид

$$\{F\} = [K]\{U\}, \quad (1)$$

где  $\{F\}$  - вектор-столбец действующих нагрузок;  $[K]$  - прямоугольная матрица жесткости системы;  $\{U\}$  - вектор-столбец неизвестных перемещений.

Для решения системы уравнений (1) использован итерационный метод Гаусса-Зейделя. Перемещения на  $m$ -ом шаге итерации вычисляются по формуле:

$$u_n^m = K_{nn}^{-1} \left\{ F_n - \sum_{i=1}^{n-1} K_{ni} u_i^m - \sum_{i=n+1}^N K_{ni} u_i^{m-1} \right\}, \quad (2)$$

где  $K_{ni}$  - элементы матрицы жесткости.

Для уточнения данного решения будем использовать прием, предполагающий умножение разностей между двумя итерациями для значений  $u$  на коэффициент  $\beta$  и следующем представлении уточненной математической величины в виде:

$$u_n^m = u_n^{m-1} + \beta(u_n^{m*} - u_n^{m-1}), \quad (3)$$

где:  $u_n^{m*}$  - значение величины, вычисленной в соответствии с (2), а  $\beta$  - значение коэффициента верхней релаксации, заключенный между 1 и 2.

После решения основной системы уравнений (1) деформации и напряжения в каждом расчетном элементе вычисляются по известным формулам.

**Обсуждение научных результатов.** Научной новизной при решении данной задачи является рассмотрение случая, когда на платформу действуют вертикальные усилия, которые зависят от координат, и эти силы приводятся к узлам; а остальная часть верхней границы области свободны от их действия. Следовательно, решается приближенная контактная задача для анизотропной системы при граничных условиях. Проведем анализ распределения перемещений и напряжений анизотропной системе «морская платформа - система заякорения - основание» от вертикальной нагрузки  $F_{zi}$  постоянной интенсивности предполагая одностороннее заякорение для: калибров цепи 53 мм, вес одного погонного метра цепи в воде  $q=0,0526$  тс/м; вертикальная составляющая проекции свободной провисающей цепи  $z=29,0$  м; полная длина цепи от клюза до якоря  $S_{кр}=180,0$  м.

На рисунке 3 показана эпюра вертикальных перемещений  $w_z$  нижнего сечения квадратной плиты, лежащей на транстропном наклонно-слоистом основании.

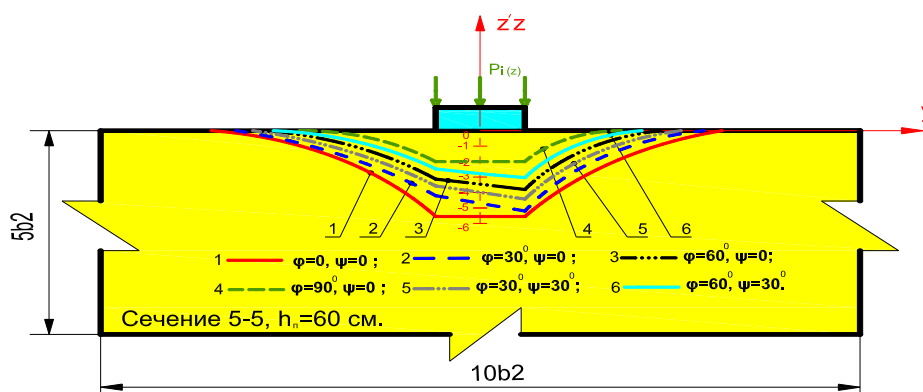


Рис. 3. Эпюры вертикальных упругих перемещений  $w_z$  основания от сосредоточенной нагрузки от сосредоточенной нагрузки  $F_{zi}$

**Заключение.** Проведя анализ полученных численных результатов, отмечается тот факт, что во всех случаях при действии наружных сил, величины статических перемещений якорных цепей зависят только от угла наклона цепей относительно дна. Перемещение самой буровой платформы зависит от величины действующих внешних нагрузок. Расчетные значения вертикальных перемещений точек контактов упругой плиты с упругим породным массивом указывает на существенную зависимость значений угла падения плоскостей изотропии  $\varphi$ , так и углов отклонения продольно расположенных осей сооружения от линии простирания последней  $\psi$ . Полная симметрия наблюдается только лишь при  $\varphi = 0$  и при любом угле  $\psi \neq 0$ ; с увеличением угла  $\varphi$  вертикальные перемещения по величине уменьшаются. В результате расчета получены новые сведения о действии наружных сил на величины статических перемещений якорных цепей.

#### Список литературы

1. Королев, В.А. Расчет систем заякорения плавучих сооружений с помощью таблиц [Текст] / В.А. Королев // Труды координационных совещаний по гидротехнике. – 1972, вып. 75. [?].
2. Королев, В.А. Расчет цепи как элемента раскрепления плавучего сооружения у обрывистого берега или набережной [Текст] / В.А. Королев, А.А. Строкин // Труды координационных совещаний по гидротехнике. – 1969, вып. 50. – С. 630-637.
3. Доусон, Т. Проектирование сооружений морского шельфа [Текст] / Т. Доусон / перевод с англ. В.А. Смелова, И.Н. Шхинека. – Л.: Судостроение, 1986. - 285 с.
4. Лехницкий, С.Г. Теория упругости анизотропии тела [Текст] / С.Г. Лехницкий. – М.: Наука, 1977. - 367 с.
5. Нигметов, М.Ж. Анализ влияния параметров упругой анизотропии и угла наклона плоскости изотропии на напряженно-деформированное состояние морских буровых платформ [Текст] / М.Ж. Нигметов, Т.Т. Султанов // Поиск. – 2004. - №4(2). - С.242-247.
6. Сугиров, Д.У. Прогноз напряженно-деформированного состояния плит якорных систем морских буровых платформ, лежащих на наклонном слоистом основании [Текст] / Д.У. Сугиров, М.Ж. Нигметов // Сборник трудов юбилейной конференции, посвященной 80-летию кафедры механики грунтов, оснований и фундаментов МГСУ. - М., 2010. - С.189-193.

*Материал поступил в редакцию 22.09.21.*

**Д.У. Сүгіров**

*Ш. Есенов атындағы Каспий технологиялар және инжиниринг университеті,  
Ақтау қ., Қазақстан*

#### ТЕҢІЗ ЖҰЗУ ҚҰРЫЛЫМДАРЫНЫҢ ЗӘКІРЛІК ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ СТАТИКАЛЫҚ ЕСЕБІ

**Аңдатпа.** Мақалада теңіз бұрғылау платформаларының жазық және кеңістіктік орналасуындағы зәкір жүйелерінің есебі ұсынылған. Зәкірлік байланыстар (шынжырлар, тростар) шынжыр сызығы бойынша салбырап тұратын иілгіш, ауыр және созылмайтын жіптер ретінде қарастырылады. Зәкірді бекітудің есептік схемалары бір жақты немесе екі жақты зәкір түрінде берілген. Статикалық есептеулер негізінде келесі болжамдар қабылданды: зәкір - бұл тізбектің ең төменгі ұшының бекітілген тақтасы; сыртқы статикалық күштердің көлденең компонентінің әсерінен қолда бар клюз тіректері тек көлденең кеңістікте қозғалады; ал сыртқы жүктемелердің көлденең компоненттерінің шамасы жұмыс және бастапқы күйдегі

тіректердің айырмашылығына тең қабылданады. Зәкір тізбектерінің статикалық қозғалыстарының барлық мәндері тек түбіне қатысты тізбектердің көлбеу бұрышына байланысты екендігі анықталды.

**Тірек сөздер:** теңіздегі жүзу жүйелері, бұрғылау платформалары, зәкір жүйелері, статикалық есептеу, қозғалыстар.

**D.U. Sugirov**

*Caspian University of technology and engineering named after Sh. Yessenov,  
Aktau, Kazakhstan*

## STATIC CALCULATION OF ANCHOR SYSTEMS OF MARINE FLOATING STRUCTURES

**Abstract.** The article presents a calculation of anchor systems in the flat and spatial arrangement of offshore drilling platforms. Anchor ties (chains, cables) are considered as flexible, heavy and non-stretchable threads that hang along the chain line. Calculation schemes for anchor fastening are presented in the form of one-way or two-way anchors. Based on static calculations, the following assumptions were adopted: the anchor is a fixed plate of the lowest end of the chain; under the influence of external static forces on the horizontal component; the existing Kluz supports move only in horizontal space; and the value of the horizontal components of external loads is assumed to be equal to the difference between the supports in the working and initial state. It was found that all the values of static movements of the anchor chains depend only on the angle of inclination of the chains relative to the bottom.

**Keywords:** marine navigation systems, drilling platforms, anchor systems, static calculation, movements.

### Referenses

1. Korolev V.A. Raschet sistem zajakorenija plavuchih sooruzhenij s pomoshh'ju tablits [Calculation of anchoring systems of floating structures using tables] // Trudy koordinacionnyh soveshhanij po gidrotehnikе [Proceedings of coordination meetings on hydraulic engineering]. 1972, issue 75. [in Russian].
2. Korolev V.A., Strokin A.A. Raschet cepi kak jelementa raskreplenija plavuchego sooruzhenija u obryvistogo berega ili naberezhnoj [Calculation of the chain as an element of loosening a floating structure at a steep bank or embankment] // Trudy koordinacionnyh soveshhanij po gidrotehnikе [Proceedings of coordination meetings on hydraulic engineering], 1969, issue 50, PP. 630-637. [in Russian].
3. Dawson T. Proektirovanie sooruzhenij morskogo shel'fa [Design of offshore structures] / Translated from the English by V.A. Smelov, I.N. Shkhinek. - Leningrad: Shipbuilding, 1986. - 285 p. [in Russian].
4. Lehnitsky S.G. Teorija uprugosti anizotropii tela [Theory of elasticity of anisotropy of a body]. - Moscow: Nauka, 1977. - 367 p. [in Russian].
5. Nigmatov M.Zh., Sultanov T.T. Analiz vlijanija parametrov uprugoj anizotropii i ugla naklona ploskosti izotropii na naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie morskikh burovnyh platform [Analysis of the influence of elastic anisotropy parameters and the angle of inclination of the isotropy plane on the stress-strain state of offshore drilling platforms] // Poisk, №4(2), 2004.- PP. 242-247. [in Russian].
6. Sugirov D.U., Nigmatov M.Zh. Prognoz naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija plit jakornyh sistem morskikh burovnyh platform, lezhashhih na naklonnom sloistom osnovanii [Forecast of the stress-strain state of plates of anchor systems of offshore drilling platforms lying on an inclined layered base] // Proceedings of the jubilee conference dedicated to the 80th anniversary of the Department of Soil Mechanics, Foundations and Foundations of MGSU. – Moscow, 2010. - PP. 189-193. [in Russian].