

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПЛАВУЧИХ ЗАЯКОРЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ

Е.В. Шонина (Санкт-Петербург)

Введение. Для освоения ресурсов Мирового океана активно используются плавучие морские нефтегазовые сооружения, работающие на удалении от берега в районе глубоких вод и подвергающиеся экстремальным природным нагрузкам.

В течение продолжительного времени эксплуатации плавучие заякоренные объекты совершают сложное движение. Системы удержания плавучих объектов являются ответственными элементами конструкции, так как они удерживают дорогостоящие сооружения. Якорные системы воспринимают на себя часть внешних нагрузок, обеспечивают безопасные условия эксплуатации и устойчивость сооружений, работающих в тяжелых условиях.

Недооценка систем удержания может привести к аварийным ситуациям или длительным неоправданным простоям сооружения в период штормового отстоя, поэтому при проектировании следует уделить особое внимание методам расчета и настройки якорных систем, дающим достоверные результаты, обеспечивающим безопасную и эффективную эксплуатацию сооружения. Это приводит к необходимости разработки инструментов оптимизации, обеспечивающих наилучший выбор параметров. Подходы к выбору параметров систем удержания обычно связаны с обеспечением достаточной работоспособности якорных связей и ограничением перемещений сооружения в допустимых пределах [1–2].

Вопрос разработки метода оптимизации системы удержания плавучего заякоренного сооружения может быть поставлен для двух режимов: режима эксплуатации сооружения и режима штормового отстоя.

В рамках работы сформулирован ряд ограничений, накладываемых на параметры системы удержания. Сформулирован критерий оптимальности для однопараметрической и многопараметрической задачи оптимизации. Представлен алгоритм оптимизации и его практическое применение.

Материалы и методы. Для решения задачи оптимизации необходимо определить и задать ряд ограничений.

В общем случае эти ограничения можно разделить на две группы.

1. Ограничения на те параметры системы удержания, которые будут подвергнуты оптимизации.

Длина каждой якорной связи L должна быть больше глубины моря в точке позиционирования и ограничиваться существующей длиной якорной цепи:

$$L_{min} < L < L_{max} . \quad (1)$$

Начальное натяжение связи F_0 формально ограничено согласно следующему выражению:

$$0 < F_0 < F_b/k_n , \quad (2)$$

где k_n – нормативный коэффициент запаса по натяжению якорных связей согласно [3], F_b – разрывное усилие связи.

Углы заложения якорных связей в плане α_i могут быть выбраны произвольно. В общем случае ограничения по расположению связей можно представить следующим образом:

$$\alpha_{i-1} < \alpha_i < \alpha_{imax}, \quad (3)$$

где i – номер связи.

2. Параметры, характеризующие поведение заякоренного сооружения под действием статических и динамических природных нагрузок, которые влияют на его безопасность.

Ограничение на натяжение якорных связей F_i , которое в любой произвольный момент времени не должно превышать предельное разрывное усилие:

$$F_i < F_b/k_n. \quad (4)$$

Угловые перемещения, которые не должны препятствовать работе сооружения и жизнедеятельности экипажа:

$$\begin{aligned} \varphi_x(t) &< \varphi_{xmax}; \\ \varphi_y(t) &< \varphi_{ymax}; \\ \varphi_z(t) &< \varphi_{zmax}. \end{aligned} \quad (5)$$

Линейные перемещения, которые не должны приводить к повреждению элементов конструкции:

$$\begin{aligned} \Delta X(t) &< \Delta X_{max}; \\ \Delta Y(t) &< \Delta Y_{max}; \\ \Delta Z(t) &< \Delta Z_{max}. \end{aligned} \quad (6)$$

В качестве критерия оптимальности в рамках данной задачи принят запас, который определяется как соотношение натяжения связи в произвольный момент времени и разрывного усилия, так как ограничения по коэффициенту запаса справедливы для обоих режимов работы сооружения.

В случае однопараметрической задачи наилучшим можно признать такое начально натяжение связей, при котором при самом худшем сочетании внешних воздействий в самой натянутой якорной связи сохраняется наибольший запас по натяжению [4]:

$$\max_{F_0} \min_k \left[\frac{F_b}{\max_i F_{i,k}(F_0)} \right], \quad (7)$$

где k – индекс, определяющий параметры внешних воздействий для каждого расчетного случая.

Аналогично критерий оптимальности можно задать для многопараметрической оптимизации:

$$\max_{F_0, L_i, \beta, \alpha_i} \min_k \left[\frac{F_b}{\max_i F_{i,k}(F_0, L_i, \beta, \alpha_i)} \right]. \quad (8)$$

Помимо начального натяжения F_0 он также включает в себя длину связи L , плановые углы заложения связей α_i и курсовой угол постановки сооружения β .

В первую очередь при проектировании системы удержания сооружения будет рассмотрен режим штормового отстоя, так как эта задача шире по сравнению с задачей оптимизации в режиме эксплуатации.

Для решения поставленной задачи необходимо выполнить многопараметрическую оптимизацию представленного функционала (8) при наличии ряда ограничений (1), (2), (3), (4), (5).

В случае решения задачи оптимизации для режима эксплуатации предполагается, что сооружение уже установлено в точке стоянки: выбран угол постановки сооружения, якорные связи размещены в плане, определена их длина. В этом случае в качестве переменного параметра будет выбрано только начальное натяжение, меняя которое необходимо добиться наивысшей безопасности сооружения в максимально возможный период времени. Будет выполняться однопараметрическая задача функционала (7) с наличием ограничений (2), (4), (5), (6), (9):

$$0 \leq f_x \leq f_{max}/k_{na}, f_z = 0, \quad (9)$$

где f_x – горизонтальная сила, передаваемая на якорь; f_{max} – держащая сила якоря; k_{na} – нормативный коэффициент запаса по держащей силе якоря; f_z – вертикальная сила, передаваемая на якорь.

Таким образом, имеется система с критерием оптимальности, который можно представить как целевую функцию, и с заданными ограничениями. Для решения задачи оптимизации предлагается учесть все ограничения, заменив их одним и перенести в целевую функцию. Для этого возможно применить метод штрафных функций. После модификации будет получен функционал, учитывающий заданные ограничения, который далее можно минимизировать.

Для поиска экстремума полученного функционала рекомендуется применить метод золотого сечения, позволяющий существенно сократить время поиска за счет уменьшения количества вычислений.

Результаты. Реализация методологии осуществлялась в рамках программного комплекса «Anchored Structures», разработанного сотрудниками СПбПУ. Программный комплекс способен решать большинство статических и динамических задач, возникающих у проектировщиков [5]. Расчет значения функционала производится на основании математического моделирования поведения плавучего заякоренного сооружения в программном комплексе. В этом программном комплексе за счет распараллеливания вычислений по ядрам многопроцессорного персонального компьютера одновременно производилось моделирование 8 штормов, действующих с различных румбов. В каждом штормовом режиме воспроизводилось постоянное во времени и неизменное по направлению течение, ветровое воздействие моделировалось как случайный процесс с учетом средней скорости ветра и ветровых порывов, описываемых спектром Давенпорта; моделировалось двумерное нерегулярное волнение, описываемое заданным спектром. В программном комплексе во временной области выполнялось моделирование поведения сооружения под действием переменных во времени случайных нагрузок в течение 6 ч (в натурном масштабе) расчетного шторма. Затем производилась обработка результатов математического эксперимента и вычислялись все параметры, необходимые для расчета составляющих функционала (8). Значению определяющих параметров $F_0, L_i, \beta, \alpha_i$ ставилось в соответствие значение оптимизируемого функционала. Используя метод золотого сечения с учетом функции штрафов, учитывающей ограничения (1) – (6), выполнялась численная процедура поиска экстремума функционала и, таким образом, оптимизация параметров якорной системы удержания.

В качестве примера ниже приводится оптимизация системы удержания полупогружной плавучей платформы проекта L-868 (рис. 1), устанавливаемой на глубине 63.7 м в Охотском море. Платформа удерживается на точке бурения с помощью якорной системы, включающей в себя 8 якорных связей.

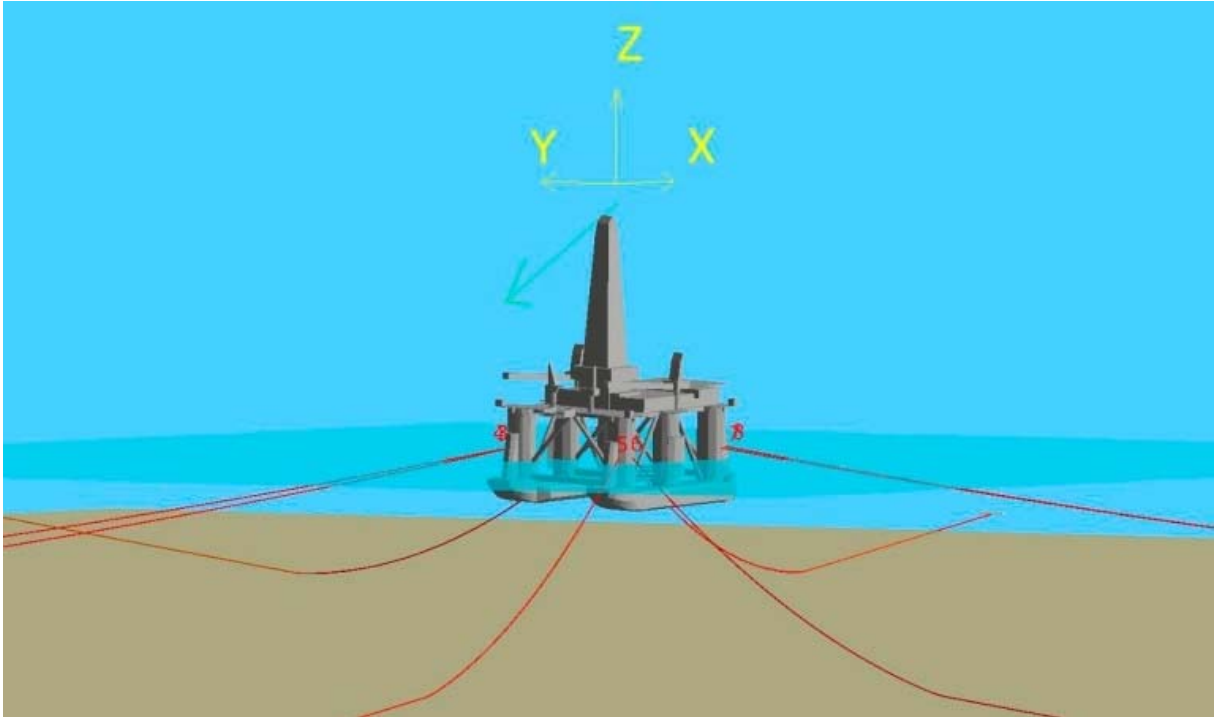


Рис. 1. Модель платформы проекта L-868

Анализ природных нагрузок опирался на внешние условия, повторяющиеся один раз в 50 лет. При этом в качестве расчетной скорости течения для режима выживания принималась экстремальная скорость поверхностного морского течения 1,55 м/с. Максимальная скорость ветра (при часовом осреднении) достигала 19,9 м/с. Ветроволновые режимы задавались для 16 направлений (рис. 2).

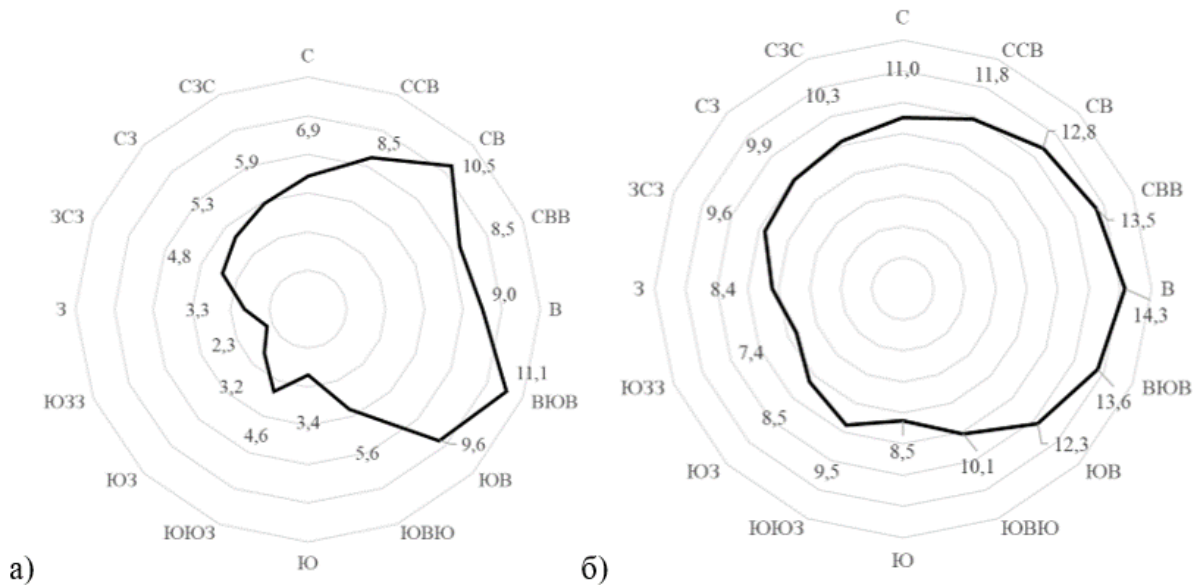


Рис. 2. Задание ветроволнового режима
 а) – высота волны 3%, м; б) – средний период, с

В исходном варианте связи длиной 1000 м расположены в плане с одинаковым шагом 45° , имеют начальное натяжение 1100 кН, что составляет 20% от разрывного усилия. Курсовой угол постановки сооружения 0° .

Представленная процедура оптимизации позволила определить параметры связей и положение платформы. Первый шаг оптимизации, связанный с поиском наилучшего натяжения связей, показал, что в исходном положении наилучшим является начальное натяжение 300 кН. Оптимизация по курсовому углу положения платформы привела к выбору оптимального курсового угла 20° . Оптимизация плановых углов расположения якорных линий привела к значениям независимых углов $\alpha_1 = 50^\circ$, $\alpha_2 = 56^\circ$ (рис. 3). Оптимизация по длине связей показала, что увеличение длины положительно сказывается на коэффициенте запаса по натяжению якорных связей. Длина троса была ограничена до 900 м, так как полученные коэффициенты безопасности имели большой запас.

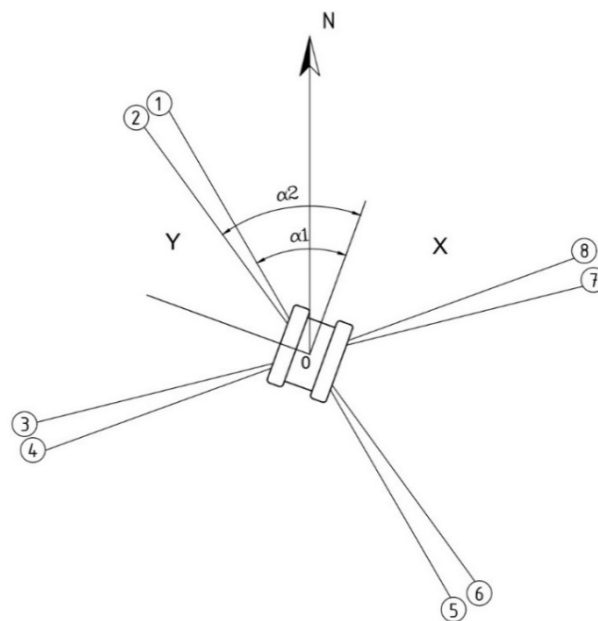


Рис. 3. Оптимизированная схема расположения якорных связей

По результатам процедуры оптимизации были получены коэффициенты запаса по натяжению связей. Сравнение коэффициентов запаса в исходном и оптимизированном случае показаны в таблице. В режиме выживания значение коэффициента запаса по натяжению связей k_n при динамическом методе расчета должно быть не менее 1,5.

Экстремальные значения коэффициентов запаса по натяжению связей в режиме выживания

Направление	k_n (исходный вариант)	k_n (оптимизированный вариант)
С	2.25	3.01
ССВ	1.69	3.77
СВ	1.36	1.97

СВВ	1.39	1.87
В	1.41	1.88
ВЮВ	1.17	2.20
ЮВ	1.48	1.99
ЮВЮ	2.28	2.79
Ю	2.03	2.48
ЮЮЗ	2.48	4.54
ЮЗ	2.54	3.54
ЮЗЗ	2.48	3.26
З	2.58	3.54
ЗСЗ	2.22	4.07
СЗ	2.26	2.97
СЗС	2.23	2.69

Заключение

В рамках настоящей работы представлен алгоритм оптимизации и его практическое применение. Процедура оптимизации позволила определить наилучшие характеристики системы удержания, при которых обеспечивается наибольший запас по значению критериального параметра безопасности.

Литература

1. **Kolacio I., Prpić-Oršić J., Kurilić K.** Analiza sidrenja poluuronjive platforme scarabeo 7. [Analysis for Semisubmersible platform Scarabeo 7]. Brodogradnja [Shipbuilding]. 2010. № 61 (1). P. 34–41.
2. **Науменко А.А., Благовидова И.Л., Пьянов А.В., Иванова О.А.** Численное моделирование процесса позиционирования сложных плавучих объектов при выполнении морских операций // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. №. 2. С. 239–247.
3. НД 2-020201-015. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2018. 461 с.
4. **Bolshev A.S., Frolov S.A., Shonina E.V.** Mooring system optimization for marine floating hydrotechnical structures // Magazine of Civil Engineering. 2022. No. 111(3).
5. **Большев А.С., Фролов С.А.** Математическое моделирование поведения морских объектов под действием природных нагрузок в среде программного комплекса «Anchored Structures» // Судостроение. 2021. №. 2 (855). С. 35–41.