



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.1:624.922:624.872

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-5-4>

Оптимизация конструкции подводного плавающего транспортного сооружения



Иван ДЕМИДОВ



Владимир ПОЛЯКОВ

Иван Михайлович Демидов ¹,
Владимир Юрьевич Поляков ²

^{1,2} Российский университет транспорта Москва, Россия.

✉ ² pyu55@mail.ru.

¹ SPIN-код: 3365–6643.

² Scopus Author ID: 57201723559,

Web of Science ID: AAS-4866-2021.

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается оптимизация внутренних усилий от постоянных нагрузок конструкции подводного пересечения для снижения локальных эффектов внутренних усилий.

Этот новый вид искусственных сооружений может найти применение при значительных глубинах пересекаемых водных преград. Такие сооружения будут востребованы для возведения подводных переходов в составе трансконтинентальных транспортных коридоров, таких как Север–Юг, Япония–Европа и других.

Целью предлагаемого исследования является оптимизация конструкции для решения проблемы перегрузок элементов сооружения. Для решения этой проблемы применялись методы строительной механики и численного экспери-

мента с использованием метода конечных элементов. Оптимизация позволяет снизить изгибающие моменты в зонах краевого эффекта в несколько раз и при применении веерной схемы закрепления. Это позволит применять унифицированные секции конструкции. В статье обосновываются методы оптимизации и их верификация с помощью метода конечных элементов.

В статье также рассматриваются проблемы живучести сооружения в случае отказа одного или двух анкерных закреплений. Изгибающие моменты значительно увеличиваются, однако движение можно не останавливать, так как нагрузка от поезда при железнодорожном движении и суммы постоянных нагрузок имеют противоположные знаки.

Ключевые слова: транспортное строительство, погруженный плавающий тоннель, SFT, оптимизация, веерное крепление, глубоководные препятствия.

Для цитирования: Демидов И. М., Поляков В. Ю. Оптимизация конструкции подводного плавающего сооружения // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 5 (108). С. 34–45. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-5-4>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Подводные плавающие транспортные тоннели представляют собой новый вид транспортных сооружений, имеющий ряд значительных преимуществ [1]. Важнейшие из них – возможность строительства при значительных глубинах, а также компенсация собственного веса конструкции выталкивающей архимедовой силой для положительной плавучести. Положительная плавучесть, предотвращающая погружение на глубину более расчётной, должна быть обеспечена и при прохождении подвижного состава. Поэтому, появление временной нагрузки от поезда, будет, вероятно, снижать внутренние усилия в конструкциях сооружения.

Как известно, сегодня максимальная глубина при строительстве опор мостов не превышает 60 м (мост Акаши-Кайке [1]).

Возможными местами применения таких сооружений являются пролив Лаперуза с глубинами более 50 м (проект создания трансконтинентальной железной дороги Европа–Япония¹ [2]), Ормузский пролив с глубинами до 100 м как продолжение коридора Север–Юг (Ашхабадское соглашение²) (рис. 1 б), Тайваньский пролив с глубинами³ более 100 м.

За рубежом неоднократно рассматривались возможности применения подводных плавающих сооружений, например, в таких локациях, как залив Функа в Японии [3], озеро Циндао в Китае [4, 5], плавающий тоннель через Хогсфьорд в Норвегии [6], а также технико-экономическое обоснование сооружения при пересечении Мессинского пролива [7]. Недостаточная разработка научных проблем не позволила реализовать эти проекты.

Возможность применения такого сооружения через горло Белого моря (рис. 1 а, рис. 2) длиной около 43 км и глубинами более 100 м рассматривается в данной статье как пример. Эта линия является перспективной

для перевозки экспортных грузов из Пермского края в Мурманск (калийных удобрений), так как позволит сократить расстояние перевозки на ~1000 км (на 30 %). Как известно, крушение моста через реку Кола в 2020 году привело к остановке поставок и прекращению на четыре месяца⁴ железнодорожного сообщения по единственной линии Октябрьской железной дороги. Поэтому строительство дублирующей линии через горло Белого моря более чем актуально. Отметим также принципиальную возможность строительства таких сооружений через пролив Гибралтар с глубинами до 1181 м и Мессинский пролив (рис. 3) и т. д.

Все упомянутые пересечения имеют глубины, значительно превышающие рекордные глубины уникального моста Акаши-Кайке.

Несмотря на очевидные преимущества сооружений SFT (submerged floating tunnel – погружённый плавающий тоннель) их проектирование не продвинулось далее технико-экономического обоснования из-за серьёзных научных проблем. Одна из таких проблем – значительные и неравномерные по длине изгибающие моменты.

Целью предлагаемого исследования является оптимизация конструкции для решения проблемы перегрузок. Для решения этой проблемы применялись методы строительной механики и численного эксперимента с использованием метода конечного элемента.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оптимизация изгибающих моментов в веерной схеме от постоянных нагрузок

Применение подводных плавающих тоннелей на больших глубинах затруднено из-за сложности в устройстве большого количества анкерных закреплений, хотя сегодня технологии бурения и обустройства скважин применяются на глубинах до 3 км [1]. Рассмотрим применение веерных анкерных тросов, соединённых в пучок (рис. 4) для уменьшения количества анкерных прикреплений или же преодоления препятствия на дне (значительные глубины или неподходящие грунты) с помощью такой конструкции. Благодаря компенсации нагрузки от собственного веса архимедовой силой величина пролета l_m мо-

¹ Дорога в Японию: Россия предложила соединить Сахалин и Хоккайдо транспортным переходом. [Электронный ресурс]: <https://russian.rt.com/russia/article/427017-most-sahalin-hokkaido>. Доступ 20.06.2023.

² В. Панфилова. Россия и страны Центральной Азии перезагрузили отношения // Независимая газета, 16.10.2022. [Электронный ресурс]: https://www.ng.ru/cis/2022-10-16/1_8566_asia.html?ysclid=lmt0ogwczd418645606. Доступ 20.06.2023.

³ [Электронный ресурс]: <https://www.worldatlas.com/traits/taiwan-strait.html>. Доступ 20.06.2023.

⁴ В Мурманской области открылся восстановленный железнодорожный мост через реку Колу. [Электронный ресурс]: <https://tass.ru/ekonomika/9567107?ysclid=lfxsugptkg929973454>. Доступ 08.04.2023.



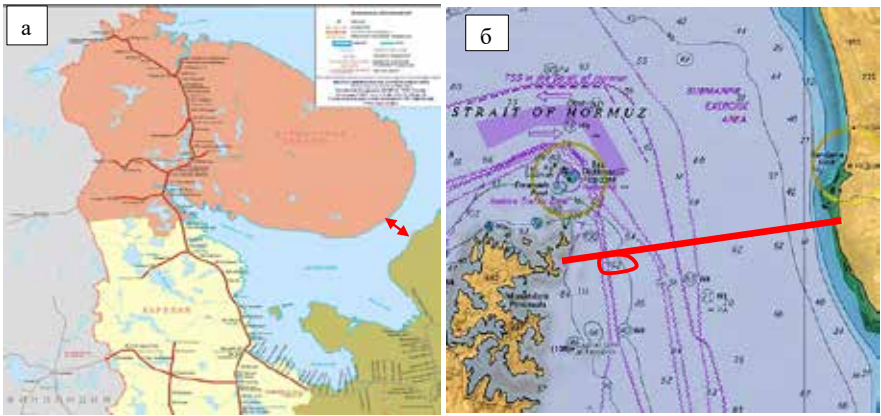


Рис. 1. Пересечение горла Белого моря (а) [[Электронный ресурс]: <https://glavtrans38.com/poleznaya-informatsiya/karta-zheleznykh-dorog/oktyabrskaya-zh-d>. Доступ 20.06.2023.], (б) Ормузского пролива [[Электронный ресурс]: <https://blog.geogarage.com/2019/05/strange-things-are-afoot-in-strait-of.html>. Доступ 20.06.2023.], где глубины превышают 100 м.

Примерное очертание дна горла Белого моря через мыс Инцы.
Масштаб по высоте x20.
(1:2000000)

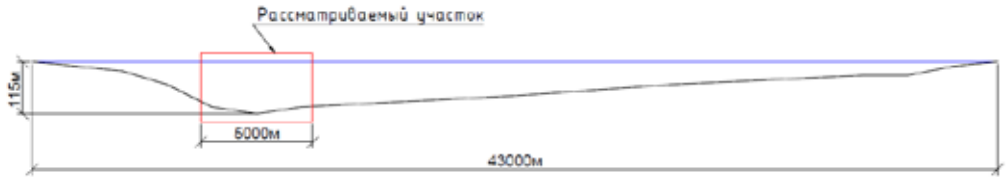


Рис. 2. Очертание дна горла Белого моря в створе мыса Инцы [разработано авторами].



Рис. 3. Сравнение плавающего тоннеля с другими сооружениями [1].

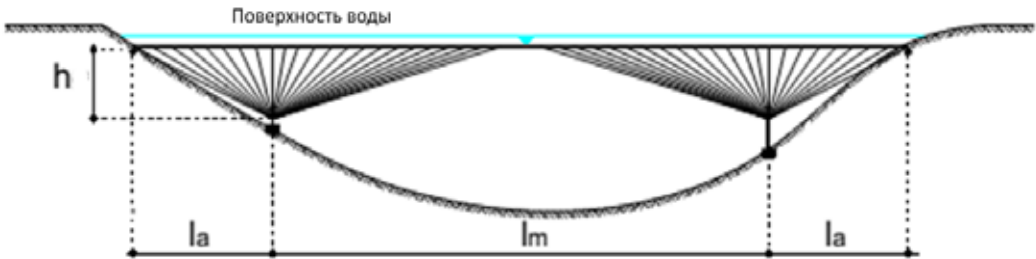


Рис. 4. Анкерные тросы в веерной схеме [8].

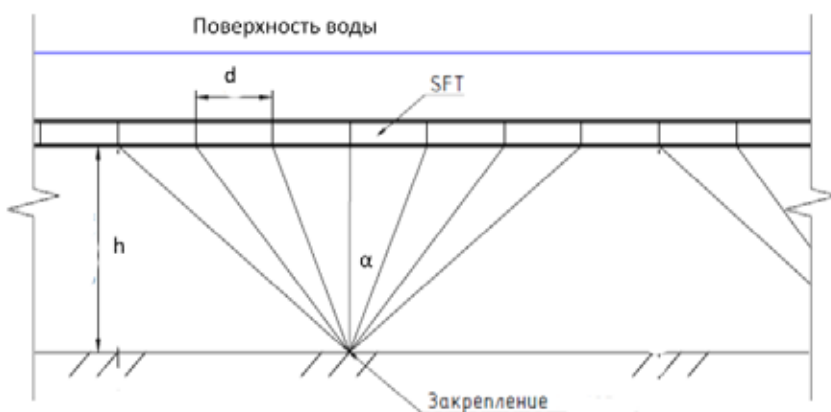


Рис. 5. Схема веерного прикрепления при больших глубинах [разработано авторами].

жет значительно превышать рекордные 1100 м для вантовых мостов.

На рис. 5 $l_0 = \frac{h}{\cos \alpha}$ — длина наклонного

троса,

где α — угол наклона троса от вертикали,

h — длина вертикального троса.

В данной расчётной схеме (рис. 5) можно для обеспечения минимизации момента достичь одинакового вертикального перемещения горизонтальной балки жёсткости сооружения путем изменения жёсткости анкерных тросов в зависимости от угла их наклона и глубины. Под постоянной нагрузкой будем понимать сумму нагрузок от собственного веса и распределенной архимедовой силы. На рис. 6 показана деформированная схема некоторого произвольного узла сооружения от суммарной постоянной нагрузки, при этом

деформации изгиба будем полагать малыми по сравнению с деформациями тросов.

Усилие в наклонных тросах:

$$F_0 = \frac{F}{\cos \alpha},$$

где F — вертикальная составляющая усилия в тросе.

Примем $\alpha' \approx \alpha$ ввиду того, что $F_n/A_n \ll E$ и $\Delta'_n \ll l_a$, где F_n — усилие в n -м тросе, A_n — площадь его поперечного сечения, E — модуль упругости троса, Δ'_n — деформация троса, l_a — длина троса до приложения нагрузки.

Вертикальная проекция продольной деформации Δ'_n n -го наклонного троса от приложения нагрузки:

$$\Delta_n = \frac{\Delta'_n}{\cos \alpha_n}.$$

Чтобы обеспечить равенство вертикальных перемещений вертикального и наклон-

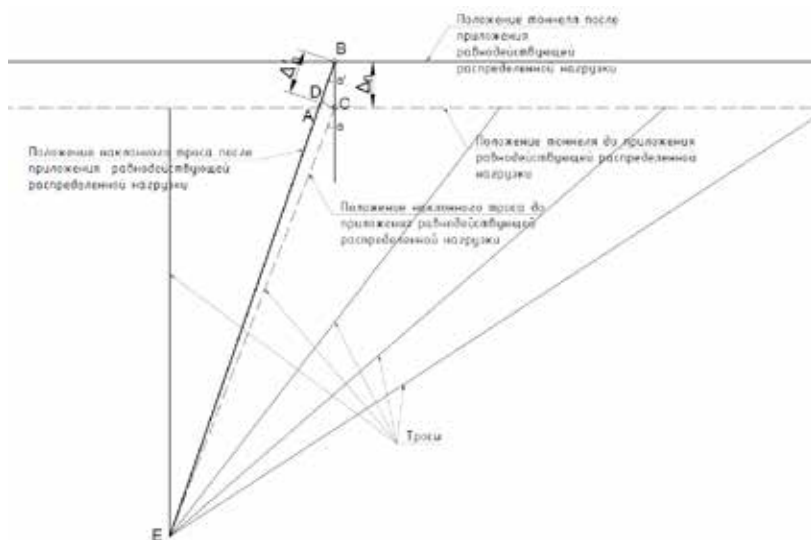


Рис. 6. Фрагмент деформированной расчётной схемы от постоянной нагрузки [разработано авторами].

Таблица 1

Площади сечений тросов для рассматриваемой модели [разработано авторами]

Глубина h_k , м	Угол наклона α_{nk} , градусы	Исходная площадь сечения тросов, м ²	Площадь сечения тросов после оптимизации по формуле (3)
160	0.00	0.0683	0.0683
160	10.62	0.0683	0.0719
160	20.56	0.0683	0.0832
160	29.36	0.0683	0.1032
160	36.87	0.0683	0.1334
200	0.00	0.0683	0.0854
200	8.53	0.0683	0.0883
200	16.70	0.0683	0.0972
200	24.23	0.0683	0.1126
200	30.96	0.0683	0.1354
240	0.00	0.0683	0.1025
240	7.12	0.0683	0.1049
240	14.04	0.0683	0.1122
240	20.56	0.0683	0.1248
240	26.56	0.0683	0.1432

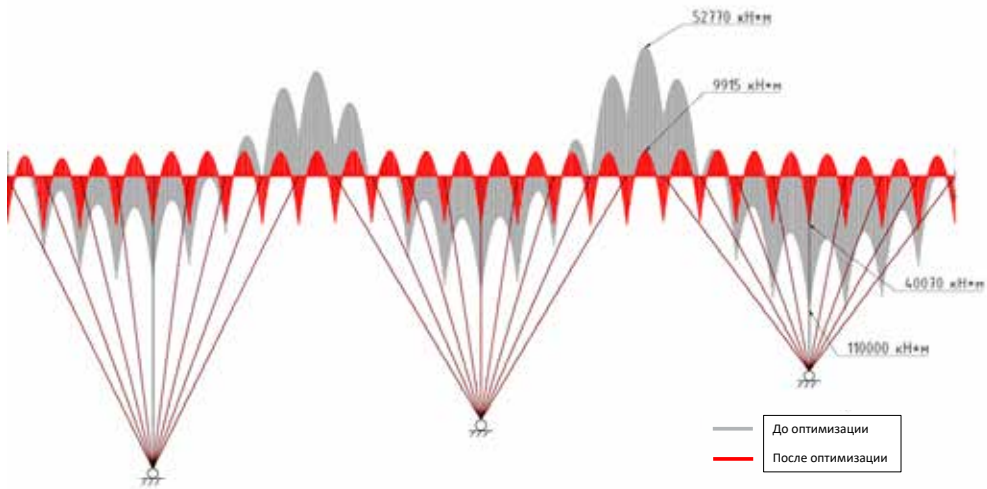


Рис. 7. Эпюры моментов в балке жесткости сооружения от постоянных нагрузок до и после оптимизации [разработано авторами].

ных тросов, положим $\Delta_o = \Delta_1 = \Delta_2 = \dots = \Delta_n$,
где n – номер троса в пучке,
 $\Delta_o = \frac{F \cdot h}{EA}$ – деформация вертикального

троса,
 $\Delta'_n = \frac{F_n \cdot l_n}{EA_n}$ – деформация n -го наклонного

троса,
 Δ_n – вертикальная проекция деформации наклонного троса,
 E, A – модуль упругости и площадь сечения вертикального троса.

При $\Delta_o = \Delta_n$:

$$\frac{F \cdot h}{EA} = \frac{F_n \cdot l_n}{EA \cos \alpha_n},$$

$$\frac{F l_o}{EA} = \frac{F}{EA_n \cos \alpha_n},$$

где A_n – площадь сечения наклонного троса.

Получим уравнение, обеспечивающее одинаковое вертикальное перемещение балки жёсткости сооружения для одного веерного узла крепления:

$$EA_n = \frac{EA}{\cos^3 \alpha_n}. \tag{1}$$

Условия для обеспечения равенства вертикальных перемещений соседнего k -го пучка (рис. 7) с другой глубиной крепления h_k и площадью сечения A_k вертикального троса:

Результаты оптимизации изгибающих моментов в балке жесткости
[разработано авторами]

Параметр	До оптимизации	После оптимизации
Минимальный момент (модуль), кНм	52770	9915
Максимальный момент, кНм	110000	40070
Среднеквадратическое отклонение, кНм	24600	8890

$$\Delta_k = \Delta_0,$$

$$\frac{Fl_k}{EA_k} = \frac{Fh}{EA},$$

$$(EA)_k = \frac{EA h_k}{h}, \quad (2)$$

где h_k/h – отношение глубины прикрепления к пучка к исходной.

Подставляя жёсткость $(EA)_k$ вертикального троса соседнего пучка из уравнения (2) в уравнение (1) вместо жёсткости вертикального троса EA , получим уравнение, обеспечивающее одинаковое вертикальное перемещение наклонных тросов на k -ом пучке:

$$(EA)_k = \frac{EA h_k}{h \cos^3 \alpha_{nk}}, \quad (3)$$

где α_{nk} – угол наклона n -го троса в k -м пучке. Отметим, что оптимальное решение не зависит от параметра EJ балки жёсткости, которая может быть любой.

В случае применения вертикальных тросов задача оптимизации значительно упрощается.

С целью верификации разработанного метода произведём численный эксперимент с помощью программного комплекса Катран, на основе метода конечных элементов. Для изменения жёсткости тросов будем изменять площадь сечения тросов. Различные варианты распределения площади сечения тросов приведены в табл. 1.

В табл. 2 приведены статистические результаты оптимизации, из которых видно, что модуль минимального момента по длине сооружения уменьшен более, чем в пять раз, максимальный момент уменьшен в 2,75 раза, что ведёт к существенному снижению материалоёмкости. Неравномерность моментов, как видно из рис. 7, существенно снижена, что демонстрируется снижением среднеквадратического отклонения в 2,8 раза (табл. 2). Указанное выравнивание значений изгибающих моментов позволит применять унифицированные секции балки жёсткости сооружения.

Краевые эффекты на припортальных участках

Припортальные участки сооружения (вблизи берегов водной преграды) располагаются на небольших глубинах. В этом случае применение всеерной схемы мало оправданно. Рассмотрим сооружение с вертикальным расположением анкерных тросов в продольном направлении. В поперечном направлении угол наклона тросов к вертикали составляет 45° . В этом случае жёсткость закреплений тоннеля от всплытия легко определяется для обеспечения минимума изгибающих моментов вне припортальных участков. Эпюра моментов в балке жёсткости (рис. 8) имеет значительный краевой эффект в зоне берегового закрепления в виде заделки, не допускающей каких-либо перемещений балки жёсткости в месте прикрепления к порталу или традиционному подземному тоннелю.

Поставим задачу снижения изгибающих моментов в зоне берегового закрепления до некоторого предписанного значения. Для решения этой задачи будем регулировать жёсткость тросов, удерживающих подводный плавающий тоннель от всплытия на припортальных участках.

Представим балку жёсткости сооружения как балку на упругом основании. Уравнение оси балки на упругом основании представляет собой

$$(EJv(x))'''' + k(x)v(x) = q(x), \quad (4)$$

где $v(x)$ – функция деформированной оси балки жёсткости.

При этом первое слагаемое представляет собой реакцию сооружения на воздействие суммарной постоянной нагрузки $q(x)$ вследствие изгиба балки, второе – вследствие деформации основания (тросов). С технологической точки зрения целесообразно считать $EJ = const$, возможность этого подтверждается результатами оптимизации в первом подразделе выше (согласно выражению (3) оптимальное решение не зависит от EJ). Кроме того при $EJ = const$ сумма постоянных нагрузок $q(x) = const$, так как выталкивающая ар-



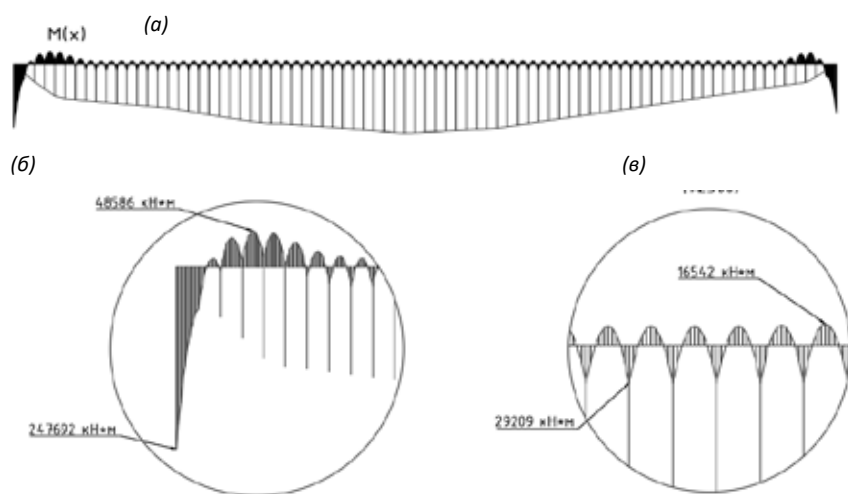


Рис. 8. Эпюры моментов в балке жесткости сооружения (а), в зоне краевого эффекта (б) и вне его (в) до оптимизации [разработано авторами].

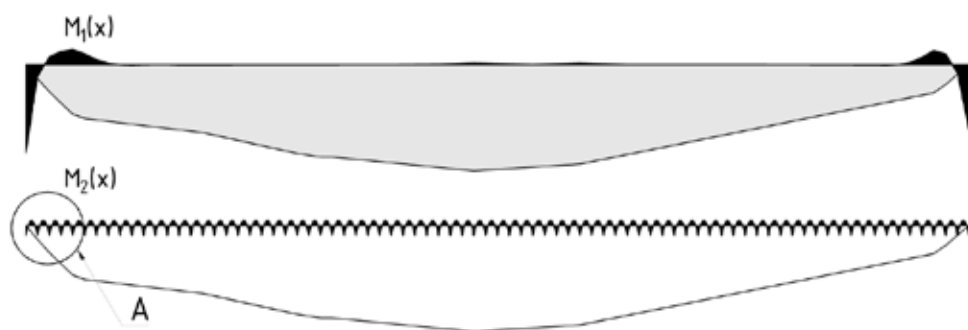


Рис. 9. Эпюры моментов при наличии краевого эффекта $M_1(x)$ и в его отсутствие $M_2(x)$ [разработано авторами].

химедова сила не зависит от x , а только от брутто-площади поперечного сечения балки жёсткости. Поскольку габарит приближения внутреннего очертания тоннеля неизменен по длине, а при снижении изменчивости изгибающего момента можно обеспечить постоянство и площади, и момента инерции приведённого сечения, то

$$EJv(x)^{IV} + k(x)v(x) = q. \quad (5)$$

Жёсткость основания $r_i(x)$ обусловлена жёсткостью тросов при их продольной деформации

$$r_i(x) = \frac{EA(x)}{l(x)}, \quad (6)$$

где E , $A(x)$ – модуль упругости и площадь сечения тросов,

$l(x)$ – длина тросов, которая зависит от глубины h ,

J – момент инерции сечения балки относительно его горизонтальной оси.

Тогда $k(x) = r_i(x)/d$,

где d – расстояние между узлами прикрепления тросов к балке, причём $d = const$ по технологическим соображениям.

Исходя из уравнения (5), получим:

$$r_i(x) = dq / v(x) - dEJ_x v(x)^{IV} / v(x). \quad (7)$$

Практика моделирования напряжённо-деформированного состояния сооружения показывает, что второе слагаемое правой части (7) на 2–3 порядка меньше первого слагаемого при значительной жёсткости балки сооружения из-за необходимости соблюдения внутреннего габарита приближения. Кроме того, для максимального снижения изгибающих моментов в зоне краевого эффекта, а, значит, снижения реакции от изгиба на действие постоянных нагрузок следует пренебречь этим вторым слагаемым, чтобы избежать значительной реакции от изгиба, в основном переложив на анкерные тросы восприятие постоянных нагрузок. Тогда, для численных экспериментов определения функции жёсткости $r_i(x)$ можно использовать выражение

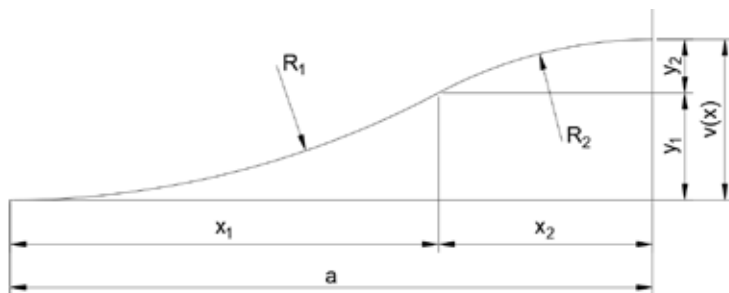


Рис. 10. Деформированная ось балки жёсткости близи берегового закрепления для управления моментом в зоне краевого эффекта [разработано авторами].

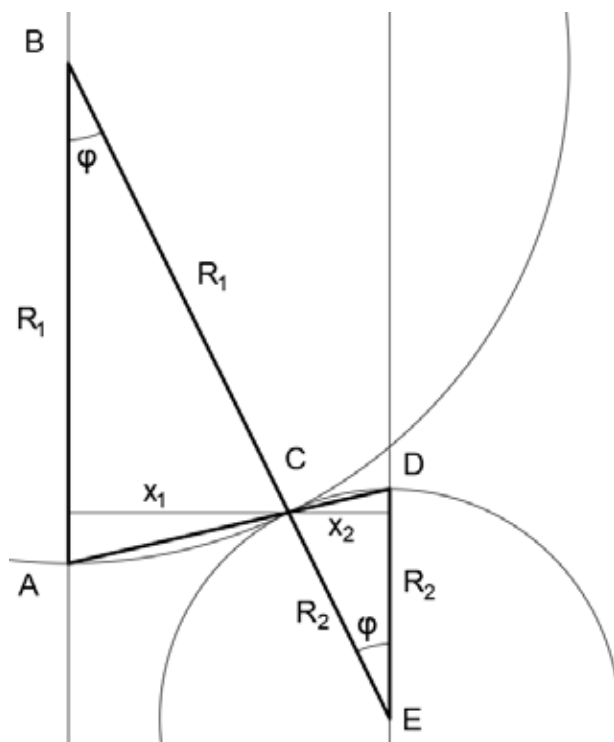


Рис. 11. Требуемая геометрия деформированной схемы для обеспечения постоянства M_1 [разработано авторами].

$$r_t(x) = \frac{d \cdot q}{v(x)}. \quad (8)$$

Функцию изгибающего момента $M(x)$ можно представить в виде суммы (рис. 9)

$$M(x) = M_1(x) + M_2(x), \quad (9)$$

где $M_1(x)$ описывает краевой эффект от берегового закрепления,

$M_2(x)$ – функция момента, где краевой эффект незначителен.

Для снижения краевого эффекта вблизи точек закрепления балки жёсткости сооружения потребуем, чтобы $M_1(x)$ представляла собой постоянную ограниченную функцию (как это происходит вне зоны краевого эффекта, где $M_1 \rightarrow 0$). Это значит, что деформированная ось балки представляет собой

окружность радиуса R_1 (рис. 10) на протяжении x_1 .

Тогда уравнение окружности на протяжении x_1 будет иметь вид:

$$R^2 = x^2 + (v(x) - R)^2. \quad (10)$$

После элементарных преобразований получим:

$$(v(x) - R)^2 = R^2 - x^2. \quad (11)$$

Или, решая квадратное уравнение $v(x)^2 - 2v(x)R + x^2 = 0$, получим:

$$v(x) = \pm \sqrt{R^2 - x^2} + R. \quad (12)$$

Знак «+» в (12) относится к участку окружности с положительной кривизной в правой системе координат, соответствующей участку x_1 , а знак «-» – к участку с отрицательной кривизной x_2 .



Таблица 3
 Параметры типового троса
 до оптимизации [разработано авторами]

Наименование	Значение
Модуль упругости троса, Мпа	201000
Количество тросов в узле прикрепления, шт	2
Площадь сечения 2-х тросов до оптимизации, м²	0,0693
Параметр сечения 2-х тросов, ЕА, Н	1,39Е+10

Таблица 4
 Оптимизированные параметры двух
 тросов в узле (расчёт по (21))

№ тросов	Вертикальная жёсткость тросов, Н/м
1	4,884Е+09
2	1,221Е+09
3	5,426Е+08
4	2,805Е+08
5	1,903Е+08
6	1,323Е+08
7	9,728Е+07
8	7,858Е+07
9	6,946Е+07
10	6,547Е+07
11	6,401Е+07
12	6,265Е+07
13	6,135Е+07

Таблица 5
 Результаты оптимизации изгибающих
 моментов в балке жёсткости сооружения
 [разработано авторами]

Параметр	До оптимизации	После оптимизации
Минимальный момент (модуль), кНм	48 586	34 665
Максимальный момент, кНм	247 692	40 547

Зададим $v(x)$ на первой части участка переменной жёсткости такое, чтобы $|M(x)|$ не превышал некоторого предельного момента M_{Π} , то есть $|M(x)| \leq M_{\Pi}$, $x \in (0; x_1)$. Тогда для учёта этого требования будем управлять функцией $M_1(x)$ и примем её равной $M_1(x) = M_n - \frac{qd^2}{12} = const$, где d – расстояние между узлами прикрепления тросов, на участке x_1 (рис. 8). В этом случае $v(x)$ является дугой окружности $v(x) = -\sqrt{R_1^2 - x^2} + R_1$, $0 < x < x_1$.

Зададим $v(x)$ на второй части участка переменной жёсткости аналогично первому, но с отрицательной кривизной. Для учёта требо-

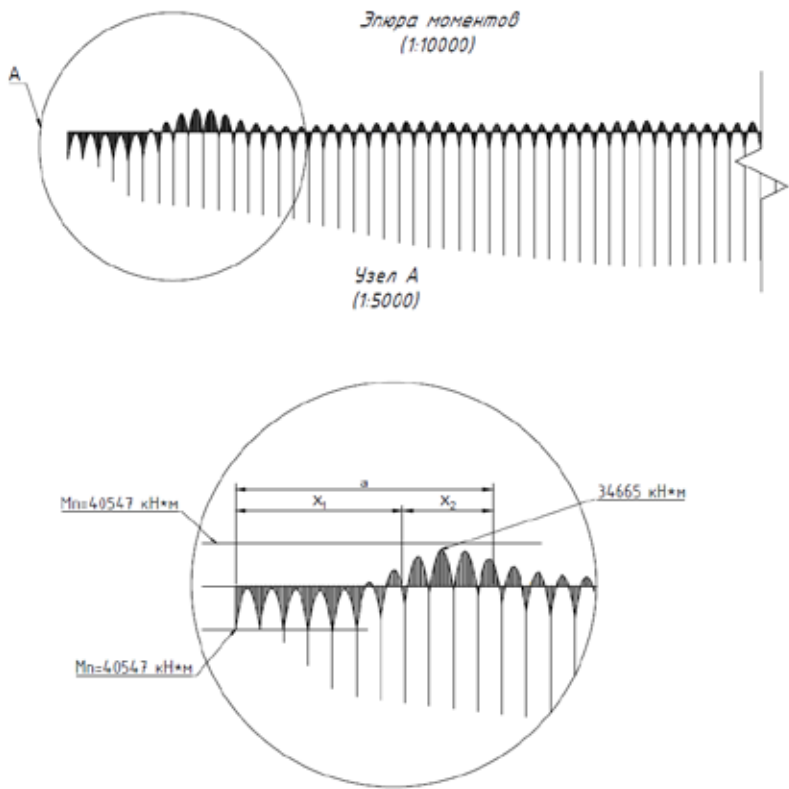


Рис. 12. Эпюра моментов при тросах переменной жёсткости [разработано авторами].

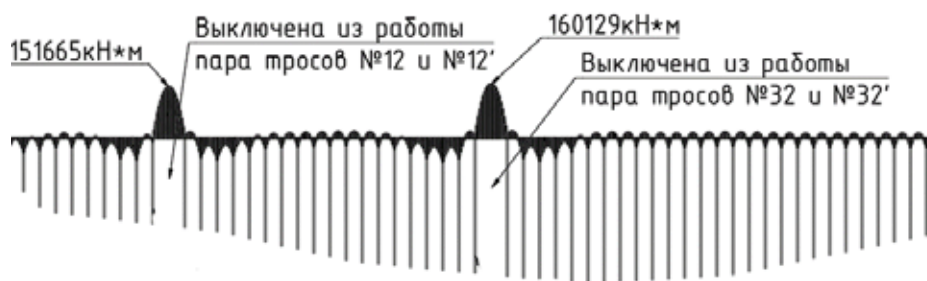


Рис. 13. Перераспределение усилий в аварийной ситуации выхода из строя одновременно двух анкерных тросов в каждом сечении [разработано авторами].

вания $|M(x)| \leq M_{\Pi}$, $x_1 < x < x_2$, примем $|M_1(x)| = M_{\Pi} - \frac{q d^2}{12}$.

a – длина участка переменной жёсткости $a = x_1 + x_2$, где x_1 и x_2 – длина первой и второй частей участка переменной жёсткости.

Как известно⁵, $\frac{1}{R} = \frac{M}{EJ}$, отсюда найдём R_1

для заданного момента $M_1(x)$:

$$R_1 = \frac{EJ}{M_1}, \quad (13)$$

где $R_1 = \frac{EJ}{M_{1x1}}$ – радиус кривой на первом участ-

ке. (14)

Соответственно, $R_2 = \frac{EJ}{M_{1x2}}$ – радиус кривой

на втором участке. (15)

Отсюда

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{M_{1x1}}{M_{1x2}} = P. \quad (16)$$

Покажем, что $R_1/R_2 = x_1/x_2$.

Построим (рис. 11) два вертикальных отрезка АВ и DE, которые параллельны. ВС и СЕ лежат на одной прямой, так как С – точка касания двух окружностей. Из того, что АВ || DE, следует, что внутренние накрест лежащие углы ϕ равны, причем ϕ – центральный угол для полухорд x_1 и x_2 . Треугольники ABC и CDE – равнобедренные, причём стороны BC/CE = BA/DE = $1/R_2$.

Поэтому, треугольники ABC и CDE подобны ввиду пропорциональности двух пар сторон и равенства углов между ними. Теперь рассмотрим треугольники FBC и CGE. Эти треугольники также подобны, так как равны все соответствующие углы треугольников. Следовательно:

⁵ Смирнов А. Ф., Александров А. В., Монахов Н. И. Сопротивление материалов: Учебник / Под. Ред. А. Ф. Смирнова. – М.: Высшая школа, 1975. – 480 с. [Электронный ресурс]: <https://bigenc.ru/b/soprotivlenie-materialov-b78c1d?ysclid=lmudtw94vu826302865>. Доступ 25.05.2023.

$$R_1 / R_2 = x_1 / x_2 = M_{1x1} / M_{1x2} = P. \quad (17)$$

При этом значения M_{1x1} и M_{1x2} определяем из соображений предельных значений M_{Π} (см. выше).

Итак, функция деформированной оси сооружения в припортовой зоне имеет вид:

$$v(x) = -\sqrt{R_1^2 - x^2} + R_1, \quad x \in (0; x_1), \quad (18)$$

$$v(x) = \sqrt{R_2^2 - (x - a)^2} + R_2, \quad x \in (x_1; a), \quad (19)$$

где $x_1 = \frac{a(x)}{1 + P}$,

$$a(x) = \sqrt{R_1^2 - \left(\frac{h(x) dq}{EA(1 + P)} - R_1 \right)^2 (P + 1)}, \quad (20)$$

A – постоянная площадь сечения троса до оптимизации.

Зная функцию прогиба (18) и (19), найдём требуемую жёсткость закрепления тросами для снижения краевого эффекта:

$$r_i(x) = \frac{EA(x)}{l(x)} = \frac{dq}{v(x)}. \quad (21)$$

Верификация метода оптимизации

С целью верификации метода оптимизации сооружения по минимуму изгибающего момента в балке жёсткости сооружения производился численный эксперимент с помощью программного комплекса Катран на основе метода конечных элементов. В рассмотренной схеме тросы располагаются парами вдоль тоннеля с шагом 30 м, глубина водной преграды до 300 м, ширина 2,5 км. Площадь сечения всегда можно обеспечить набором параллельных тросов. Параметры троса, расположенного вертикально в продольной проекции, до оптимизации указаны в табл. 3. Ограничим значение максимального по модулю момента до 40547 кНм.

Найдём необходимую жёсткость тросов на участке переменной жёсткости по формуле (21). Оптимизированные параметры тросов



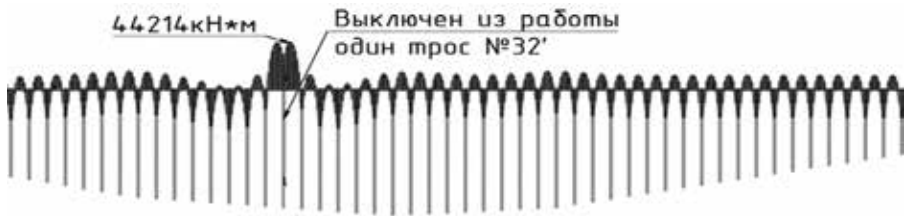


Рис. 14. Перераспределение усилий в аварийной ситуации выхода из строя одного анкерного троса [разработано авторами].

Таблица 6
Изменения продольных усилий в тросах в двух вариантах аварийной ситуации
[разработано авторами]

Номер троса	№ 31	№ 32	№ 33
Усилие до обрыва, кН	7313	7314	7318
Усилие после обрыва двух тросов, кН	9499	-	9477
Усилие после обрыва одного троса, кН	7890	10765	7888

приведены в табл. 4. На рис. 11 приведена эпюра моментов в балке жёсткости сооружения. Как видно из сравнения эпюр до оптимизации (рис. 8) и после оптимизации (рис. 12), краевой эффект от берегового закрепления балки жёсткости значительно уменьшен.

Очевидно, что в случае значительной требуемой площади сечения будут применяться тросовые пакеты или иные конструкции.

В табл. 5 показаны сравнительные параметры напряжённо-деформированного состояния (изгибающие моменты) до и после оптимизации по предложенному методу. Как видно из табл. 5, максимальный момент снижен более чем в 6 раз, минимальный момент – более чем в 1,4 раза. Из таблицы видно, что максимальное значение изгибающего момента не превышает заданное ограничение 40547 кНм.

Живучесть сооружения

Живучесть – свойство объекта сохранять работоспособность при наличии дефектов или повреждений определённого вида, а также при отказе некоторых компонентов⁶. Рассмотрим два случая выхода из строя отдельных тросов анкерного закрепления балки жёсткости сооружения вследствие разруше-

ния анкерного закрепления, обрыва двух тросов или одного троса. Первый расчётный случай представляется маловероятным ввиду расположения анкеров на дне на расстоянии не менее девяти метров (диаметр одиночной балки однопутного сооружения) при вертикальных анкерных тросах. В действительности в поперечной проекции тросы имеют наклон для обеспечения поперечной устойчивости балки при действии временных нагрузок (колебания подвижного состава, течения, воздействие поверхностных волн). Это ведёт к еще большему расстоянию между анкерами, а, значит, к снижению вероятности разрушения двух анкерных закреплений балки одновременно. Выход (обрыв) одновременно двух тросов маловероятен, но заслуживает рассмотрения.

В первом случае происходит перераспределение изгибающих моментов, показанное на рис. 13. Как видно из сопоставления рис. 8 и рис. 13, изгибающие моменты возрастают почти в десять раз. Отметим, однако, что увеличение изгибающего момента приблизительно одинаковое в разных узлах закрепления и не зависит от глубины (длины тросов). Таким образом, унификация сборочных секций балки жёсткости, достигнутая в первом подразделе выше, сохраняется, даже если производить расчёт прочности в этой аварийной ситуации. Перегрузки, связанные с выходом из строя анкерных тросов, остаются локальными (рис. 13). Отметим также, что ввиду противоположного направления равнодействующей постоянных нагрузок и временной нагрузки от подвижного со-

⁶ ГОСТ Р 27.102-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Надежность в технике. Термины и определения. [Электронный ресурс]: https://hseblog.ru/kb/document/3094/files/12625/ГОСТ%20Р%2027.102-2021%20Надежность%20в%20технике.%20Надежность%20объекта.%20Термины%20и%20определения_Текст.pdf?ysclid=lmug1h8vsb527543341. Доступ 25.05.2023.

става, присутствие подвижного состава уменьшит перегрузки. Таким образом даже в случае рассматриваемой аварийной ситуации движение полностью можно не останавливать. Важным представляется возможность обеспечения прочности балки и в этой аварийной ситуации из-за её значительной высоты, превышающей девять метров, для соблюдения внутреннего габарита приближения строений.

Второй расчётный случай, связанный с выходом одного из анкерных тросов, представляется более вероятным. В этом случае (рис. 14) изгибающие моменты возрастают в значительно меньшей степени, чем в первом расчётном случае. Отрицательный момент возрастает приблизительно в 2,6 раза в сравнении со штатной ситуацией (рис. 8).

Изменение продольных усилий в анкерных тросах в аварийных ситуациях показано в табл. 6. В случае обрыва одновременно двух тросов усилия в соседних тросах возрастают на 30 %, при обрыве одного троса усилие в оставшемся тросе из пары – на 47 %. И в этом случае при появлении подвижного состава перегрузки тросов будут уменьшаться, то есть аварийная ситуация позволит продолжить движение поездов.

При учёте указанных перераспределений внутренних усилий живучесть сооружения будет обеспечена.

ВЫВОДЫ

В статье обоснована работоспособность подводного плавающего транспортного сооружения. Разработан инженерный метод оптимизации изгибающих моментов в балке жёсткости подводного плавающего сооружения, позволяющий в несколько раз снизить изгибающие моменты в зонах припортовых участков, а также значительно снизить изгибающие моменты на глубоководных участках с веерным закреплением анкерных тросов. Такое решение позволяет применять при строительстве унифицированные секции балки жёсткости сооружения.

Живучесть сооружения может быть обеспечена как в случае выхода из строя одного, так и двух анкерных тросов, при этом нагрузка от поезда снижает перегрузки от постоянных нагрузок ввиду противоположного направления равнодействующей постоянных нагрузок и временной нагрузки от подвижного состава, то есть присутствие подвижного состава уменьшит перегрузки. Таким образом, даже в случае рассматриваемой аварийной ситуации движение полностью можно не останавливать.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Поляков В. Ю., Хорев И. В., Демидов И. М. Современные подходы к исследованию и разработке подводных плавающих сооружений // Транспортные сооружения. – 2022. – Т. 9. – № 3. – Ст. 7. DOI: 10.15862/08SATS322.
2. Винокуров М. А., Суходолов А. П. Экономика Иркутской области: В 3 т. – Иркутск: Изд-во БГУЭП (ИГЭА), 2002. – Т. 3. – 432 с. ISBN: 5-7253-0677-1. [Электронный ресурс]: <https://opac.nsuem.ru/mm/2015/000212732.pdf>. Доступ 27.05.2023.
3. Maeda, N., Morikawa, M., Ishikawa, K., Kakuta, Y. Study on structural characteristics of support systems for submerged floating tunnel. Proceedings of the 3rd Symposium on Strait Crossings, Ålesund, Norway, 1994, pp. 579–674. [Электронный ресурс]: <https://www.gbv.de/dms/tib-ubhannover/193950901.pdf>. Доступ 25.04.2023.
4. Martinelli, L., Barbella, G., Feriani, A. Modeling of Qiandao Lake submerged floating tunnel subject to multi-support seismic input. Procedia Engineering, 2010, Vol. 4, pp. 311–318. DOI: 10.1016/j.proeng.2010.08.035.
5. Mazzolani, F., Landolfo, R., Faggiano, B., Esposto, M., Martire, G., Perotti, G. Structural Analyses of the Submerged Floating Tunnel Prototype in Qiandao Lake (PR of China). International Journal Advances in Structural Engineering, 2008, Vol. 11, Iss. 4, pp. 439–454. DOI: 10.1260/136943308785836862.
6. Skopra, L. Innovative norwegian fjord crossing. How to cross the Høgsjord, alternative methods. Proceedings of the 2nd Congress AIOM (Marine and Offshore Engineering Association), Naples, Italy, 1989. [Электронный ресурс]: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/ref/2017/52/mateconf_eacef2017_02026/mateconf_eacef2017_02026.html. Доступ 25.04.2023.
7. Bruschi, R., Giardinieri, V., Marazza, R., Merletti, T. Submerged Buoyant Anchored Tunnels: Technical Solution for the Fixed Link across the Strait of Messina Italy. Proceedings of the 2nd Symposium on Strait Crossings. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1990, pp. 605–612.
8. Jin, Chungkuk, Kim Hansung. Dynamic Responses of a Submerged Floating Tunnel in Survival Wave and Seismic Excitations. Proceedings of the 27th International Ocean and Polar Engineering Conference, San Francisco, CA, USA, 25–30 June 2017. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2017, pp. 547–551. DOI: 10.12989/OSE.2017.7.1.001. ●

Информация об авторах:

Демидов Иван Михайлович – аспирант кафедры мостов и тоннелей Российского университета транспорта, Москва, Россия, dmdvp@rambler.ru.

Поляков Владимир Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры мостов и тоннелей Российского университета транспорта, Москва, Россия, pyu55@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 13.06.2023, одобрена после рецензирования 15.11.2023, принята к публикации 17.11.2023.

