

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2023, Том 10, № 2 / 2023, Vol. 10, Iss. 2 <https://t-s.today/issue-2-2023.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/10SATS223.pdf>

DOI: 10.15862/10SATS223 (<https://doi.org/10.15862/10SATS223>)

Оптимизация формы контура погруженного пересечения водных преград

Поляков В.Ю., Хорев И.В.

ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Поляков Владимир Юрьевич, e-mail: pvu55@mail.ru

Аннотация. Погруженный плавающий тоннель (также SFT от англ. Submerged Floating Tunnel) — инновационное решение для пересечения крупных акваторий со значительными глубинами. Сооружение обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными решениями, такими как вантовый и висячий мосты, подводный тоннель из опускаемых секций, а также традиционный тоннель. На данный момент не реализовано ни одного проекта, однако концепция привлекает внимание исследователей из разных стран, так как необходимость в таких сооружениях будет возрастать из-за потребности в сокращении времени транспортировки массовых грузов на трансконтинентальных маршрутах.

В процессе эксплуатации конструкции SFT подвергаются разного рода воздействиям, среди которых воздействие течений на балку жесткости

тоннеля. Таким образом форма контура SFT ключевым образом сказывается на характере взаимодействия тоннеля с течением и определяет возникающие при этом внешние силы (сила лобового сопротивления FD и подъемные силы FL). Оптимальная форма контура SFT с точки зрения взаимодействия с течением позволяет предопределить благоприятную работу конструкции в данных условиях. В настоящей статье выполнена оценка воздействия течения на балку жесткости SFT с применением программного комплекса и выполнена оптимизация формы балки с использованием возможностей градиентной оптимизации.

Ключевые слова: погруженный плавающий тоннель; SFT; течение; лобовое сопротивление; подъемная сила; CFD; вычислительная гидродинамика; оптимизация; градиентный метод

Contour shape optimization of the submerged intercrossing water obstacles

Vladimir Yu. Poliakov, Igor V. Khorev

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Corresponding author: Vladimir Yu. Poliakov, e-mail: pv55@mail.ru

Abstract. The submerged floating tunnel (also SFT from the English Submerged Floating Tunnel) is an innovative solution for crossing large water areas with significant depths. The structure has a number of advantages compared to traditional solutions, such as cable-stayed and suspension bridges, an underwater tunnel made of immersed tubes, as well as a traditional tunnel. The main advantages are the ability to cross water obstacles with depths significantly exceeding the record values for bridges (60 m), as well as compensation of loads from its own weight by Archimedean force to ensure positive buoyancy. At the moment, not a single project has been implemented due to serious scientific problems, but the concept is attracting the attention of researchers from different countries, since the need for such structures will increase due to the need to reduce the time of transportation of bulk cargo on transcontinental routes.

During operation, SFT structures are subject to various types of influences, including the effect of currents on the tunnel stiffening girder. Thus, the SFT contour shape has a key effect on the nature of the tunnel interaction with the current and determines the external forces that arise (drag force F_D and ascending forces F_L). The optimal SFT contour shape from the view point of interaction with the current allows one to predetermine the favorable operation of the structure under given conditions. In this article, the current impact on the SFT stiffening girder was assessed using a software package and the girder shape was optimized using gradient optimization capabilities. The article is part of the author's dissertation research.

Keywords: submerged floating tunnel; SFT; current; drag force; ascending force; CFD; computational fluid dynamics; optimization; gradient method

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



1. Погруженный плавающий тоннель — инновационная концепция

1. Submerged floating tunnel — an innovative concept

Погруженный плавающий тоннель (также SFT от англ. Submerged Floating Tunnel) — инновационное сооружение транспортной инфраструктуры, решающее проблему пересечения глубоких акваторий.

Активное внимание данная научная проблема получила в конце XX века, в основном в Норвегии, Японии, Италии и Южной Корее, хотя хронология развития концепции SFT берет свое начало в конце XIX века. На данный момент в мировой практике нет примеров реализации подобных сооружений. Из-за серьезных научных проблем проектирование прекращалось после этапа технико-экономического обоснования.

Наша страна обладает значительным транзитным потенциалом, являясь за счет своего географического положения важным элементом грузовых потоков между основными макроэкономическими полюсами — странами Европейского союза и Азиатско-Тихоокеанского региона, а в более отдаленной перспективе — между странами Америки и Евразии.

Строительство северного широтного хода предполагает пересечение ряда протяженных по ширине рек вблизи побережья Северного ледовитого океана.

Перспективным представляется строительство таких сооружений через горло Белого моря для резервирования единственной ж.д. линии, находящейся вблизи границы с Финляндией. В более отдаленной перспективе — строительство пересечения пролива Лаперуза для трансконтинентальной линии Европа-Япония. Это подтверждает актуальность развития концепции SFT для России.

Общепринятыми решениями при пересечении крупных акваторий являются: вантовый и висячий мосты, подводный тоннель из опускных секций, а также традиционный тоннель [1]. Однако применение мостовых сооружений ограничено возможностями сооружения опор при значительных глубинах.

Так, максимальная глубина, при которой производилось сооружение опор моста в настоящее время не превышает 60 м, а глубины проливов, где актуально строительство пересечений превышают 100 м, превосходя в некоторых случаях 1 000 м. При этом бурение и обустройство скважин (пригодных для устройства анкерных креплений SFT) в настоящее время производится при глубинах до 3 000 м [2].

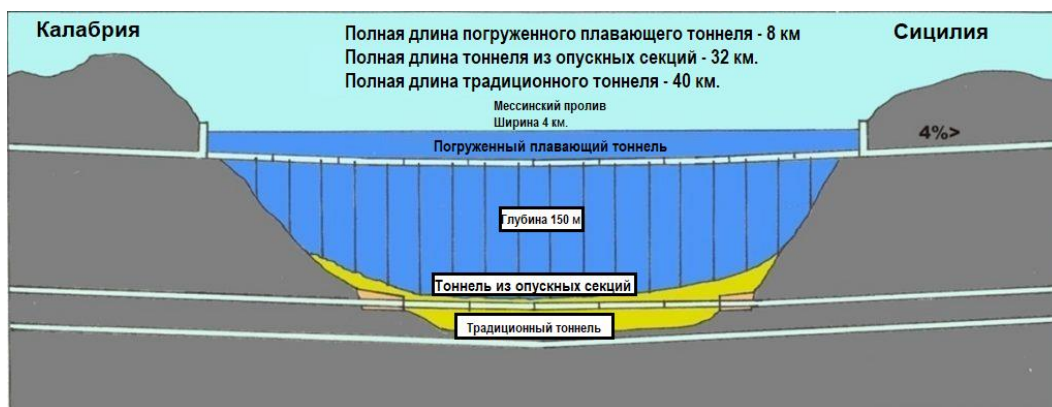


Рисунок 1.1. Сравнение вариантов пересечения Мессинского пролива [3]

Figure 1.1. Crossing variation comparison for the Strait of Messina [3]

Основными преимуществами SFT являются:

- компенсация нагрузки от веса конструкций выталкивающей (архимедовой) нагрузкой;
- минимальное влияние на гидросферу и морфологию дна акватории;
- меньшая общая длина сооружения за счет меньшей длины участков подхода на проектную отметку при пересечении глубоководных препятствий;
- отсутствие препятствий для судоходства, т. к. тоннель располагается ниже поверхности воды на 15–30 м;
- беспрепятственный пропуск ледохода;
- простота производства работ при применении технологии изготовления секций на полигоне с последующей буксировкой к месту погружения аналогично тоннелю из опускных секций.

Согласно общепринятой концепции SFT определяются, как состоящий из секций тоннель с положительной или нулевой плавучестью, который погружен в воду и закреплен ко дну акватории анкерными тросами против всплытия [4]. Термин «тоннель» отражает эксплуатационные характеристики тоннеля: герметичность, освещенность, вентиляция. Однако с точки зрения напряженно-деформированного состояния это сооружение имеет больше сходства с мостами. Таким образом, конструктивной особенностью SFT является баланс между вертикальными нагрузками (собственным весом и полезной нагрузкой) и выталкивающими силами [5]. В отличие от мостов, эти нагрузки имеют разный знак, и выталкивающая сила полностью компенсирует собственный вес и полезную нагрузку, что ведет к снижению усилий в сооружении. Исследуя плавучие платформы, нашим коллегам также приходилось решать ряд вопросов, которые имеют много общего с конструкцией погруженного плавучего тоннеля [6; 7].

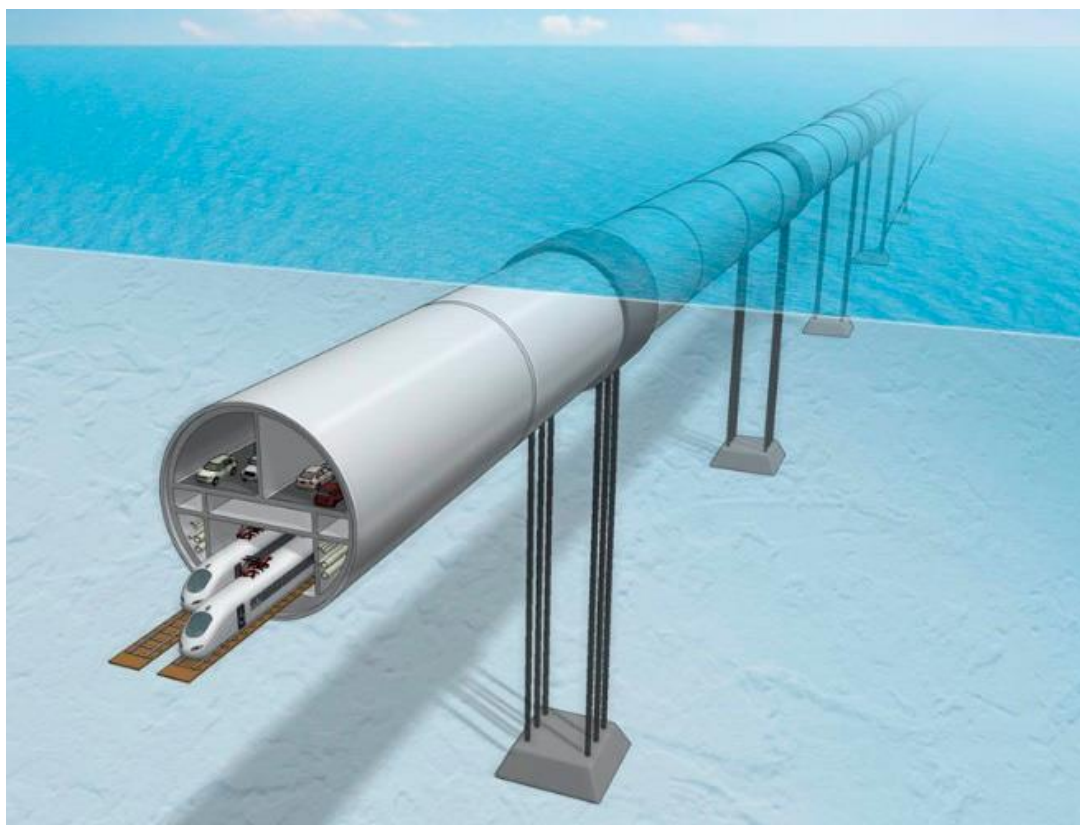


Рисунок 1.2. Подводный плавающий тоннель с положительной плавучестью, закрепленный анкерными тросами к морскому дну [8]

Figure 1.2. Submerged floating tunnel with positive buoyancy, secured by anchor cables to the seabed [8]

В процессе эксплуатации погруженный плавающий тоннель подвергается различным внешним воздействиям, среди которых: течения, волны, навал судов (в случае их затопления), сейсмические воздействия, а также нагрузки техногенного характера.

Таким образом очертание контура секций тоннеля должно удовлетворять следующим требованиям:

- парирование внешних воздействий течений и поверхностных волн;
- достаточная жесткость в плоскостях возникновения колебаний;
- непотопляемость (сохранение неотрицательной плавучести при нарушении герметичности);
- индустриальность.

В рамках данной статьи исследуется взаимодействие контура SFT с течениями. Результатом является оценка воздействия течения на контур SFT и его оптимизация с целью снижения этого воздействия.

2. Постановка задачи оценки воздействия течения и способы ее решения

2. Research objective of assessing the currents impact and methods for solving it

Оптимизации формы контура погруженного плавающего тоннеля предшествует задача оценки воздействия водного течения на контур SFT. Эта задача может быть решена тремя известными способами: экспериментально, аналитически, численно.

Все способы имеют общий объект исследования — внешние силы, которые возникают при взаимодействии потока с контуром сооружения. Возникновение этих сил объясняется тем, что контур SFT для потока является плохо обтекаемым препятствием, в следствие чего по контуру возникает распределение давления из-за стремления потока сохранить циркуляцию скорости. Таким образом внешние силы (сила лобового сопротивления F_D и подъемные силы F_L) являются результатом интегрирования давления по поверхности обтекаемого контура SFT и во многих случаях являются объективными параметрами для оценки воздействия потока на контур. Сила лобового сопротивления отражает величину горизонтальной поперечной нагрузки на сооружение. Её снижение приведет к снижению внутренних усилий в сооружении.

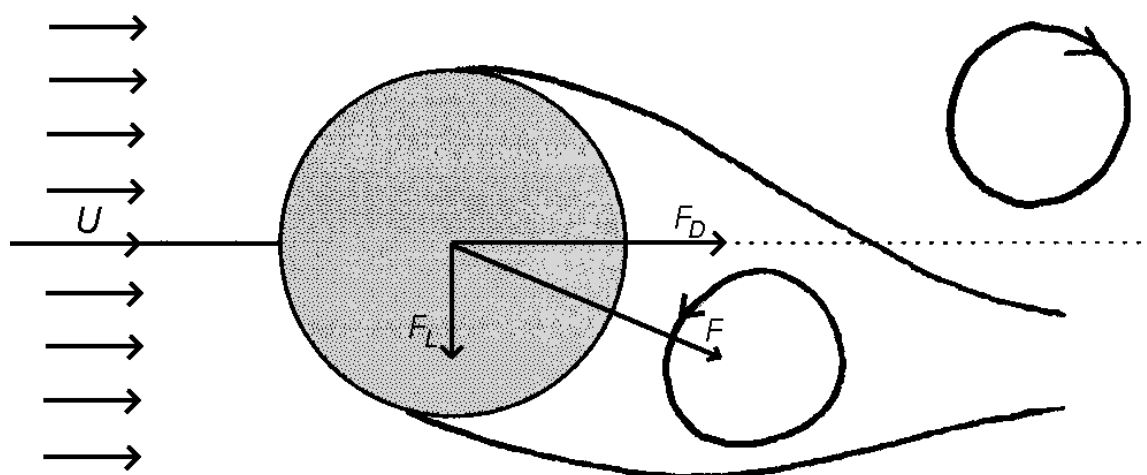


Рисунок 2.1. Подъемная сила, сила лобового сопротивления и их равнодействующая [9] при воздействии потока на контур SFT

Figure 2.1. Ascending force, drag force and their resultant [9] when exposed to current on the SFT contour

Подъемная сила при отсутствии нагрузки от подвижного состава вызовет увеличение усилий в анкерных тросах и анкерах, что нежелательно.

Но основная опасность переменной подъемной силы — вертикальные автоколебания сооружения.

Если эти колебания принимают резонансный характер (флаттер), то возникает опасность разрушения сооружения или его нормальной эксплуатации вследствие чрезмерных деформаций (угроза схода поезда).

Аналитический подход

Analytical approach

При решении задачи аналитическим методом посредством общей формулы для получения суммарных сил давления потока (на единицу ширины потока) в направлениях векторов исследуемых сил (силы лобового сопротивления и подъемной силы) расчетная модель может быть ограничена параметрами, используемыми в аналитической формуле.

Среди этих параметров коэффициент лобового сопротивления для контура SFT, плотность вещества потока, скорость потока и характерный размер контура в направлении исследуемой силы (для сил лобового сопротивления — полная высота контура, для подъемных сил — полная ширина контура).

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho U^2 B, \quad (2.1)$$

где U — скорость потока, м/с; C_D — коэффициент лобового сопротивления; ρ — плотность воды, кг/м³; B — характерный размер контура SFT перпендикулярно потоку.

Исходя из вышеприведенной формулы, можно прийти к выводу, что коэффициент C_D определяют обтекаемость контура SFT (табл. 2.1, рис. 2.2).

Таблица 2.1 / Table 2.1

Режимы течения несжимаемой жидкости

Incompressible flow modes

	А Докритический A Precritical	В Критический B Critical	С Сверхкритический C Supercritical	Д Пост- сверхкритический D Post-supercritical
Пограничный слой Boundary layer	Ламинарный Laminar layer	Переходный Transition layer	Турбулентный Turbulent layer	Турбулентный Turbulent layer
Число Струхала S Strouhal number S	$0.212 - \frac{2.7}{Re}$	$\left(0.212 - \frac{2.7}{Re}\right) > S > 0.45$	0.35–0.45	0.29
Число Рейнольдса Reynolds number	$< 2 \times 10^5$	$2 \times 10^5 - 5 \times 10^5$	$5 \times 10^5 - 3 \times 10^6$	$> 3 \times 10^6$

Источник [10] / Source [10]

Из рисунка 2.2 можно определить коэффициент лобового сопротивления рассматриваемого контура SFT. Сначала необходимо определить число Рейнольдса для исследуемого потока:

$$Re = \frac{UL}{\nu}, \quad (2.2)$$

где: U — скорость потока; L — характерный размер препятствия, диаметр контура; ν — кинематический коэффициент вязкости.

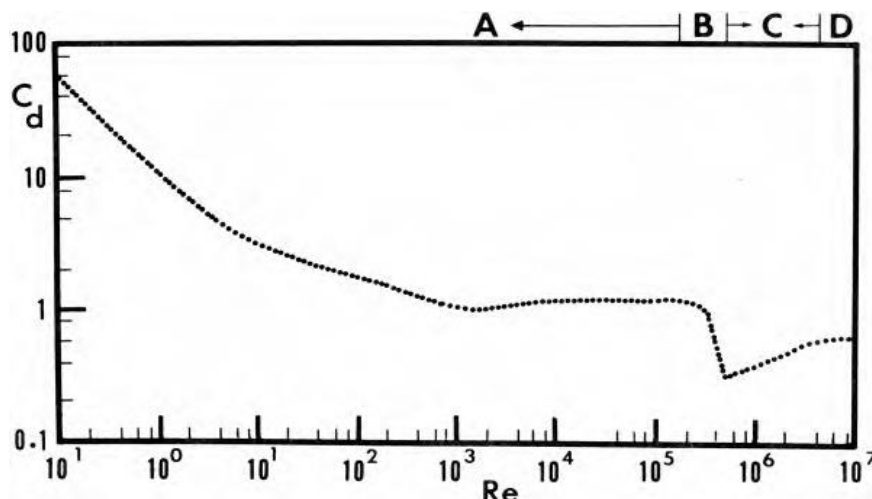


Рисунок 2.2. Изменение коэффициента лобового сопротивления в зависимости от числа Рейнольдса для кругового цилиндра [10; 11]

Figure 2.2. Drag force coefficient variation depending on the Reynolds number for a circular cylinder [10; 11]

Приложения аналитической модели

Analytical model applications

Рассмотренная аналитическая модель для определения внешних сил, возникающих при взаимодействии потока и контура, может быть применены в конкретной задаче.

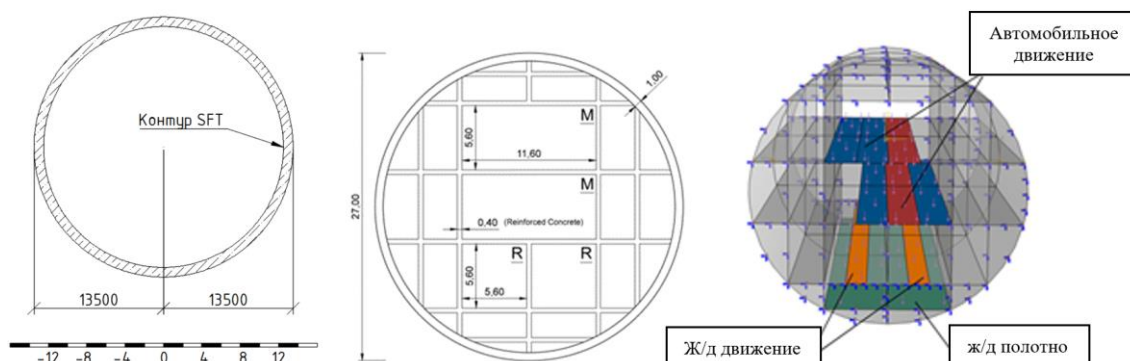


Рисунок 2.3. Тоннель с кольцевым сечением с совмещенным движением (составлено авторами)

Figure 2.3. Circular cross-section tunnel with combined traffic (compiled by the authors)

Имея контур SFT с внешним диаметром $D = 27$ м для двухпутной ж.д. и автодороги, на который действует течение акватории плотностью $\rho = 998,8$ кг/м³ со скоростью $U = 4$ м/с (условия Мессинского пролива).

Число Рейнольдса, для рассматриваемого случая взаимодействия согласно формуле (2.2):

$$Re = \frac{4 \cdot 27}{1 \cdot 10^{-6}} = 1,08 \cdot 10^8.$$

На основе полученного числа Рейнольдса и графика (рис. 2.2) коэффициент лобового сопротивления C_D составляет 0,75.

Подставляя полученные значения в формулу (2.1), получаем:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot 0.75 \cdot 998.8 \cdot 4^2 \cdot 27 = 161.81 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

Как видно, сила сопротивления, или воздействие потока на сооружение вполне сопоставима с нагрузкой от подвижного состава железной дороги, нормативное значение которой на один путь составляет 137 кН/м.

Однако, в действительности реальное взаимодействие потока с плохообтекаемым препятствием, каким в нашем случае является контур SFT, представляется гораздо сложнее. При обтекании контура имеют место такие явления, как срыв вихрей, образование вихревой дорожки и спутной струи. Эти явления вызывают изменение состояния течения, следовательно, изменение характера взаимодействия с контуром и, соответственно, значения составляющих равнодействующей силы. Поэтому полученные аналитическим путем результирующие силы лобового сопротивления F_D и подъемные силы F_L не отражают полной картины взаимодействия контура конструкции с потоком [12].

3. Численное моделирование взаимодействия контура SFT с течением

3. Numerical modeling of the SFT contour interaction with the current

Рассматриваемая задача может быть решена посредством численного моделирования в программных комплексах, предназначенных для решения подобных задач. Среди них ANSYS, OpenFoam, ABAQUS и SolidWorks. Перечисленные программные комплексы используют методы вычислительной гидродинамики (также CFD от англ. computational fluid dynamics) для определения характеристик потока. Таким образом, в данных моделях большую роль играет частота пространственно-временной дискретизации потока и сооружения, выбор подходящего расчетного метода и корректная обработка результатов в постпроцессорах.

3.1 Базовая методология

3.1 Base methodology

Процесс решения задачи воздействия потока на контур SFT с точки зрения базовой методологии делится на три стадии: препроцессинг, анализ, постпроцессинг.

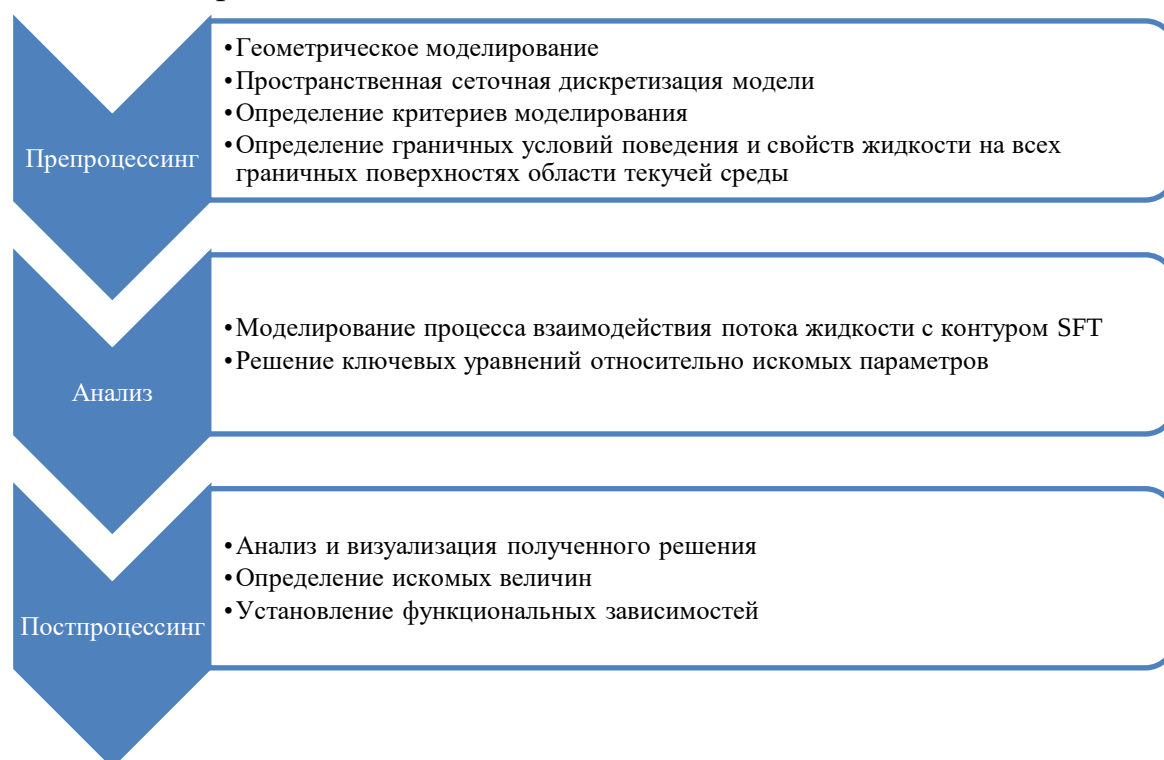


Рисунок 3.1. Процесс решения задачи воздействия потока на контур SFT с точки зрения базовой методологии (составлено авторами)

Figure 3.1. The problem solving process of the current influence on the SFT contour from the base methodology point of view (compiled by the authors)

Препроцессинг

Preprocessing

На первом этапе (препроцессинг) выполняется формирование геометрии расчетной модели с учетом требований, необходимых для корректной работы расчетного аппарата программного комплекса. В случае моделирования взаимодействия контура SFT с течением акватории необходимо выдерживать минимальные расстояния от входной грани потока до контура и то же самое до выходной грани.

После формирования геометрии выполняется пространственная сеточная дискретизация модели, в частности поля потока, с учетом необходимой точности расчета. В особенности это касается областей сетки вблизи обтекаемого контура, где в процессе обтекания потока происходят

существенные изменения его свойств. В целом геометрия и дискретизация расчетной модели определяются принятыми критериями моделирования и допущениями расчетной модели. Допущения позволяют сэкономить затраты вычислительных мощностей при анализе модели путем учета только тех явлений, которые оказывают влияние на ключевые параметры потока.

Граничными условиями для модели являются:

- границы для входа и выхода потока;
- скорость на входе;
- стенки: стенки, симметрия;
- внутренние зоны: жидкость, твердое тело.

Анализ

Analysis

Плоское течение однородной несжимаемой вязкой жидкости (ньютоновской жидкости) описывается уравнениями Навье-Стокса (3.1–3.3) и уравнением неразрывности (3.4):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \operatorname{div} \mathbf{q} = 0 \quad (3.4)$$

где u , v , w представляют компоненты скорости в направлениях x , y , z соответственно; X , Y , Z — составляющие силы на единицу массы в соответствующих направлениях; p — давление; ν — кинематическая вязкость жидкости.

Левые части уравнений (3.1–3.3) представляют собой субстанциональные или материальные производные D/Dt для компонент скорости u , v и w . В данном случае материальная производная для компоненты скорости, например u , является суммой локального $\frac{\partial u}{\partial t}$ и конвективного $u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}$ ускорений.

Уравнения (3.1–3.4) образуют систему нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка. Аналитическое решение системы уравнений имеет место в очень простых случаях, когда число Рейнольдса для задачи мало, а геометрия обтекаемого препятствия проста. В большинстве случаев исследователи пользуются численными методами. Важную роль в данном случае играет качество дискретизации исследуемой пространственно-временной области.

При расчете течений в двухмерной постановке (2D) для задач CFD применяются 6 основных моделей вязкости:

- невязкая Inviscid;
- ламинарная Laminar;
- Спаларта-Аллараса Spalart-Allmaras;
- двухпараметрическая k-epsilon;
- двухпараметрическая k-omega;
- рейнольдсовых напряжений Reynolds Stress.

Все модели турбулентности относятся к моделям RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes, осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса). Метод осреднения Рейнольдса заключается в замене случайно изменяющихся характеристик потока (скорость, давление, плотность) суммами осреднённых и пульсационных составляющих. В случае стационарного течения несжимаемой ньютоновской жидкости уравнения Рейнольдса записываются в виде:

$$\rho \bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right], \quad (3.5)$$

где ρ — плотность жидкости; u_i — скорость в направлении i ; $\bar{u}_i$ — осредненная по времени скорость в направлении i ; $\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$ — конвективный член, который представляет изменение скорости $\bar{u}_i$ в направлении i в процессе течения потока в направлении j ; $\bar{f}_i$ — осредненная по времени сила, действующая в направлении i ; $\bar{p}$ — усредненное по времени давление; δ_{ij} — дельта-функция Кронекера, равная 1, когда $i = j$, и 0 в противном случае; μ — динамическая вязкость жидкости; u'_i и u'_j — пульсирующие скорости в направлениях i и j соответственно; $\overline{u'_i u'_j}$ — произведение пульсирующих скоростей в направлениях i и j .

Переменные, осреднённые по времени, отмечены в этом уравнении чертой сверху, а пульсационные составляющие — апострофом.

Левая часть уравнения (нестационарный член) описывает изменение количества движения жидкого объёма, вследствие изменения во времени осреднённой составляющей скорости.

Это изменение компенсируется (см. правую часть уравнения) осреднёнными внешними силами $\rho \bar{f}_i$ осреднёнными силами давления $-\bar{p}\delta_{ij}$, вязкостными силами $\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$.

Кроме того, в правую часть входят кажущиеся напряжения (напряжения Рейнольдса, турбулентные напряжения) $(-\rho \bar{u'_i u'_j})$, учитывающие дополнительные потери и перераспределение энергии в турбулентном потоке (по сравнению с ламинарным потоком).

Такие модели могут описывать только осредненное турбулентное движение и работают даже при использовании довольно грубой (по сравнению с размерами турбулентных вихрей) сеткой. Модели RANS довольно хорошо изучены, описаны их области применения, и их можно применять для моделирования как двух, так и трехмерных течений.

Стоит отметить, что объектом исследования в данном случае являются внешние силы (сила лобового сопротивления F_D и подъемные силы F_L) возникающие со стороны потока, а не изменение свойств потока в турбулентном состоянии. Поэтому в данном случае имеет место применение либо ламинарной (Laminar) модели, либо модели Спаларта-Аллмараса (Spalart-Allmaras) с наименьшими затратами вычислительных мощностей.

Постпроцессинг

Postprocessing

На этапе постпроцессинга выполняется реализация полученных результатов посредством представления их в виде векторов, эюр и изополей. Предоставляется возможность построения хронологии изменения и зависимости для параметров модели. На этапе постпроцессинга исследователем выполняется формирование отчета.

3.2 Численный подход к оценке воздействия течения на контур секций SFT

3.2 Numerical approach to assessing the current impact on the SFT sections contour

В рамках данной задачи будут рассмотрены две вероятных формы контура секций SFT: сдвоенного кольцевого сечения и эллиптического.

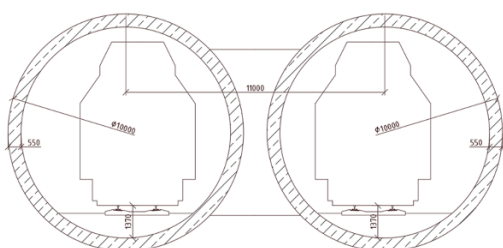


Рисунок 3.2. Конструкция SFT со сдвоенным кольцевым сечением (составлено авторами)

Figure 3.2. Double ring SFT design (compiled by the authors)

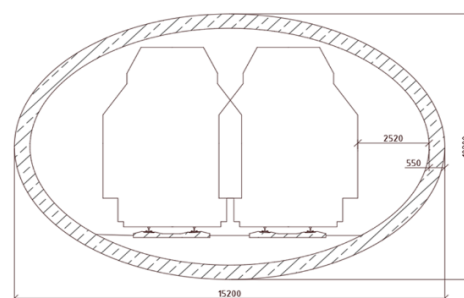


Рисунок 3.3. Конструкция SFT с эллиптическим сечением (составлено авторами)

Figure 3.3. SFT design with elliptical cross-section (compiled by the authors)

Исходные данные:

- расстояние от поверхности воды до оси SFT — 38 м;
- расстояние от дна акватории до оси SFT — 42 м;
- плотность воды в акватории — 998,8 кг/м³;
- скорость течения (Мессинский пролив [13]) — 4 м/с.

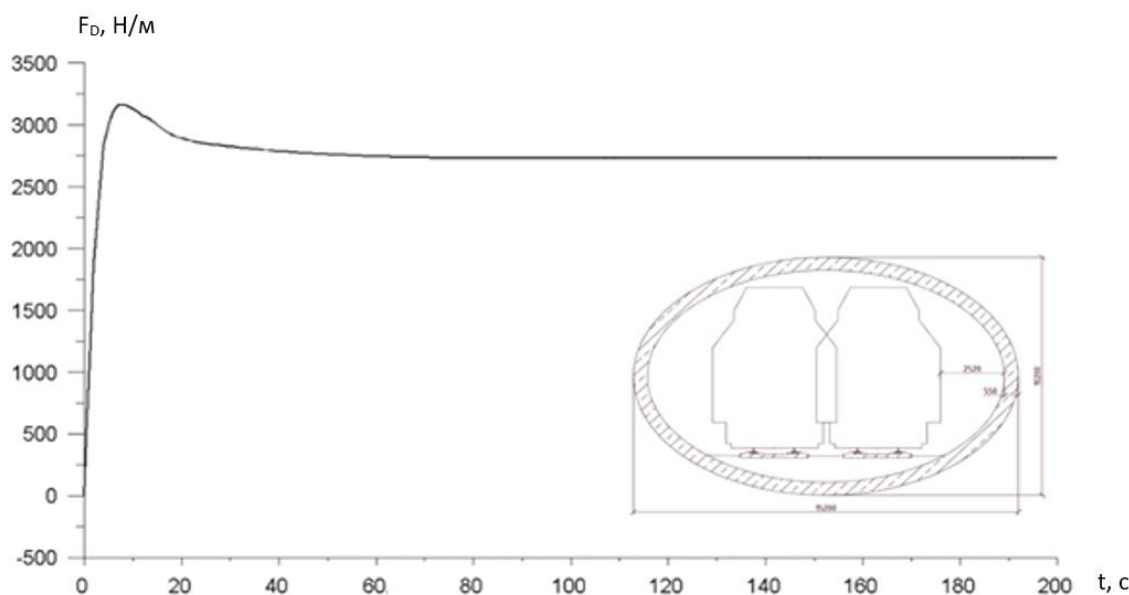


Рисунок 3.4. График изменения сил лобового сопротивления для эллиптического сечения (составлено авторами)

Figure 3.4. Diagram of changes in drag forces for an elliptical section (compiled by the authors)

Изменение значений лобового сопротивления (рис. 3.4) во временной области численного моделирования от 0 до 20 с обусловлено влиянием нулевых начальных условий модели, затем значения стабилизируются (2 735 Н/м).

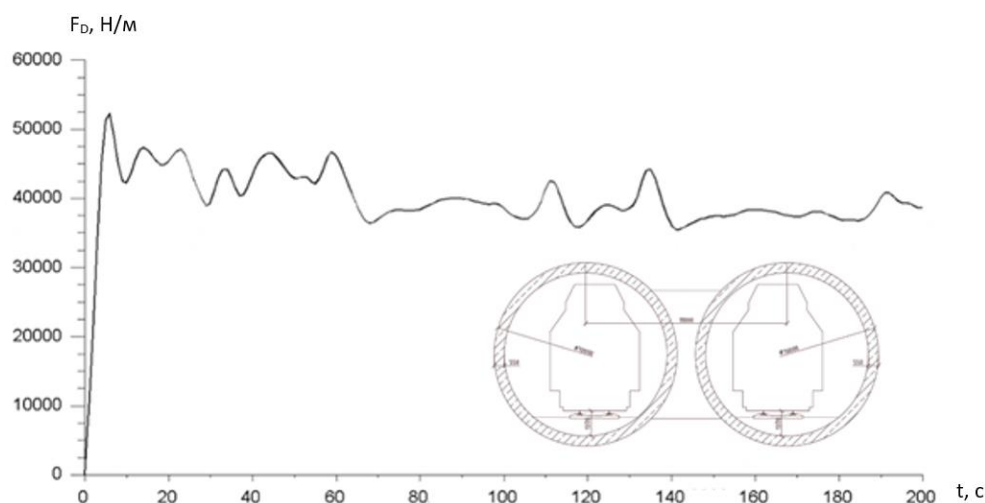


Рисунок 3.5. График изменения сил лобового сопротивления для сдвоенного кольцевого сечения (составлено авторами)

Figure 3.5. Diagram of changes in drag forces for a double annular section (compiled by the authors)

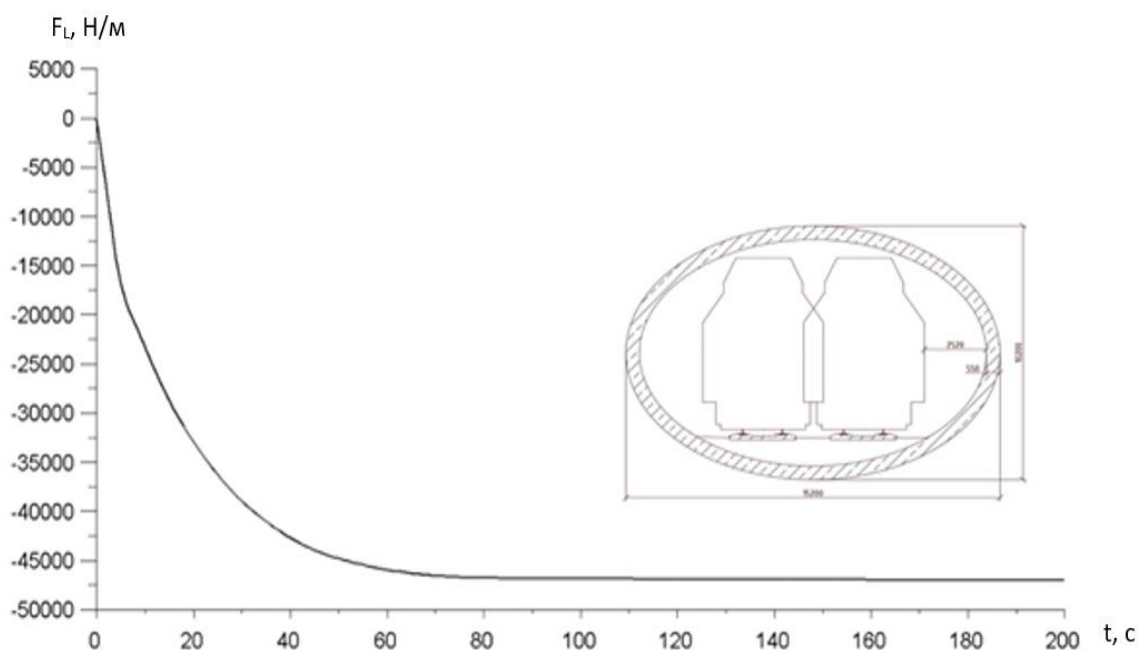


Рисунок 3.6. График изменения подъемных сил для эллиптического сечения (составлено авторами)

Figure 3.6. Diagram of changes in ascending forces for an elliptical section (compiled by the authors)

Диаграмма (рис. 3.5) имеет нестационарный характер, что может стать причиной поперечных горизонтальных колебания конструкции.

Отрицательные значения на диаграмме (рис. 3.6) говорят о том, что подъемная сила действует в направлении силы тяжести и принимает устойчивые значения (-46 960 Н/м).

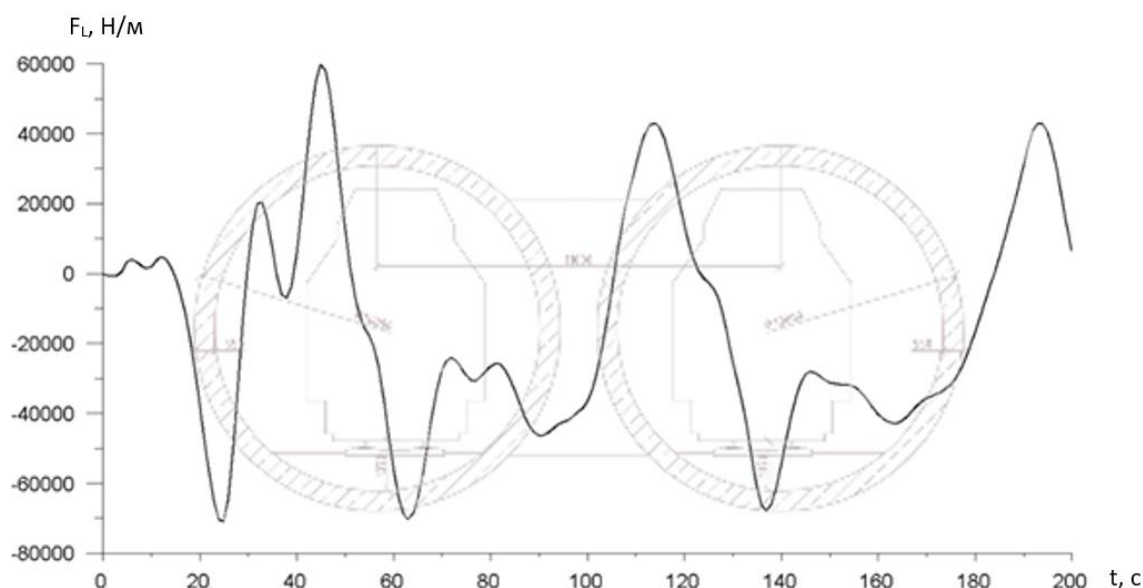


Рисунок 3.7. График изменения подъемных сил
для сдвоенного кольцевого сечения (составлено авторами)

Figure 3.7. Diagram of changes in ascending forces
for a double annular section (compiled by the authors)

На диаграмме (рис. 3.7) просматриваются колебания подъемных сил с определенной периодичностью в диапазоне от -70 800 Н/м — 56 700 Н/м. Это может стать причиной автоколебаний конструкции в поперечном вертикальном направлении.

3.3 Поиск компромиссного значения для геометрического параметра сечения

3.3 Поиск компромиссного значения для геометрического параметра сечения

Размеры конструкции SFT в горизонтальном поперечном направлении играют большую роль в картине взаимодействия конструкции с потоком.

Таким образом путь к уменьшению лобового сопротивления лежит через нахождения оптимального (компромиссного) расстояния в свету для конструкции со сдвоенным кольцевым сечением.

Поиск такого значения осуществляется путем оценки воздействия течения на контур конструкции SFT при различных значениях расстояния в свету (b) для исследуемого сечения.

Затем определяется компромиссное значение, при котором силы лобового сопротивления и подъемные силы минимальны и гармонизированы.

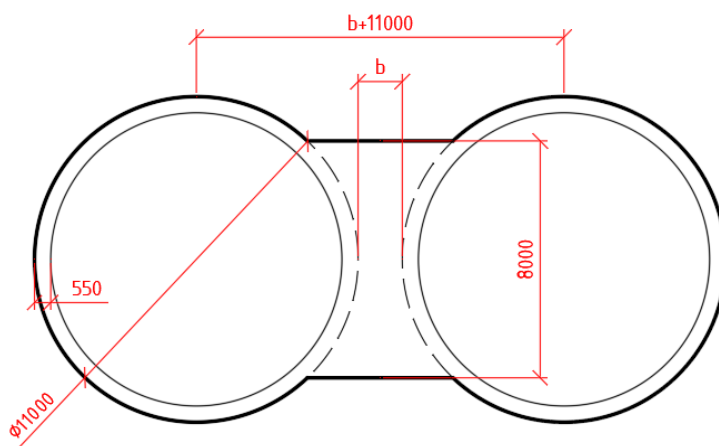
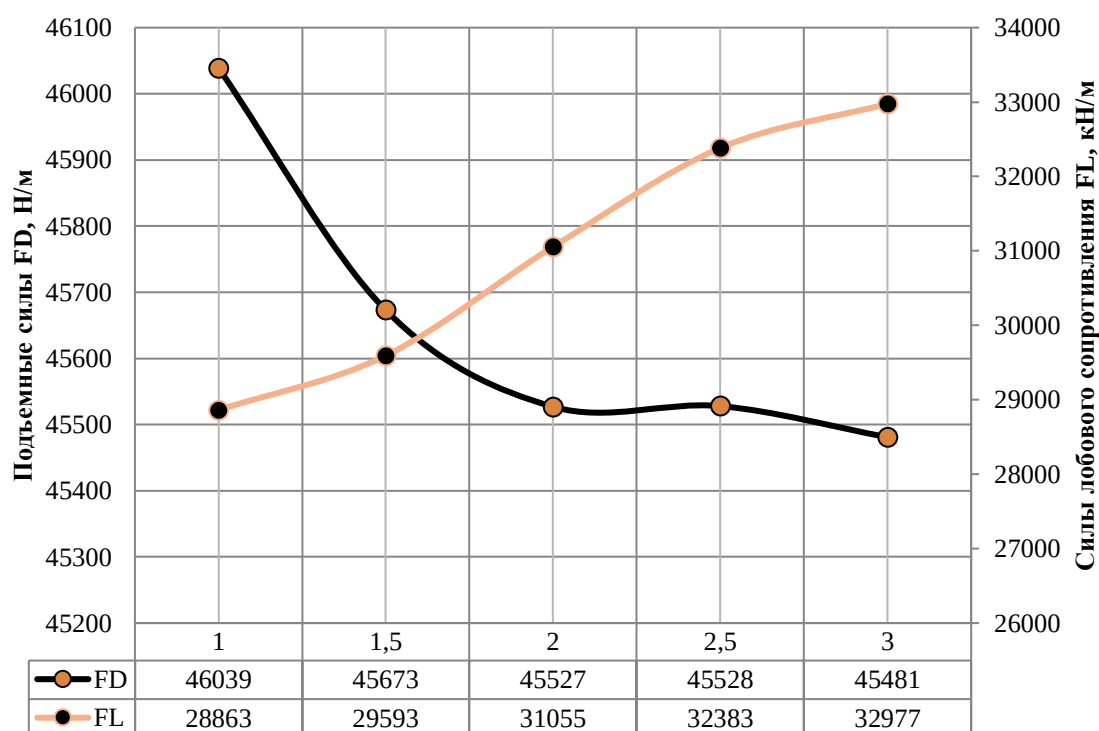


Рисунок 3.8. Геометрия сдвоенного кольцевого сечения SFT (составлено авторами)

Figure 3.8. Geometry of the SFT double annular section (compiled by the authors)



Расстояние в свету b (м) и соответствующие значения FD и FL (кН/м)

Рисунок 3.9. Изменение сил лобового сопротивления и подъемных сил в зависимости от расстояния в свету между кольцами (b) (составлено авторами)

Figure 3.9. Drag and ascending forces variation depending on the clear distance between the rings (b) (compiled by the authors)

На диаграмме (рис. 3.9) видно, что графики изменения внешних сил пересекаются вблизи одной из точек исследуемого параметра (b). Таким образом компромиссное значение расстояния между кольцами в свету (b) равняется 1,5 м.

4. Оптимизация формы контура с применением численного подхода

4. Contour shape optimization using a numerical approach

4.1 Оптимизация в задачах газо- и гидродинамики

4.1 Optimization in problems of gas and hydrodynamics

Методы математической оптимизации позволяют решать задачи поиска наиболее подходящего решения (экстремума) для рассматриваемой математической модели при соблюдении соответствующих ограничений. Оптимизация нашла свое применение во многих инженерных дисциплинах, в том числе при решении задач вычислительной газо- и гидродинамики.

Первые приложения методов были применены в отношении задач авиации, в частности для поиска оптимального профиля крыла летательного аппарата, с точки зрения возможной минимизации сил лобового сопротивления и подъемных сил.

В газо- и гидродинамике градиентные методы занимают особое место. В таком приложении они часто полагаются на сопряженное приближение, которое способно вычислять чувствительность целевой функции по отношению к проектным переменным. Опыт показывает, что в задачах газо- и гидродинамики метод сопряженного приближения превосходит другие известные математические методы. Он может быть реализован в дискретной или непрерывной (континуальной) форме [14].

На сегодняшний день существуют программные комплексы, имеющие в своем арсенале мощные инструменты для выполнения оптимизации геометрии твердых тел в задачах взаимодействия с потоками. Для расчетного случая взаимодействия контура погруженного плавающего тоннеля с течением это позволяет получить выгодный контур с точки зрения регулирования внешних сил, возникающих со стороны потока, и управления состоянием конструкции в условиях необходимых ограничений (габариты приближения строений, толщины конструкций и т. д.).

Процессу оптимизации формы контура конструкции предшествует численный CFD-расчет взаимодействия исследуемой конструкции с потоком. Из всего перечня полученных данных приоритетными являются конкретные величины, а именно сила лобового сопротивления F_D и подъемная сила F_L или их соотношение, ради регулирования которых проводится оптимизация. Таким образом, в данной модели эти величины выступают целевыми параметрами для оптимизации.

Базовая методология

Base methodology

Как было упомянуто ранее на первом этапе выполняется CFD-расчёт потока. Порядок расчета представлен ниже.

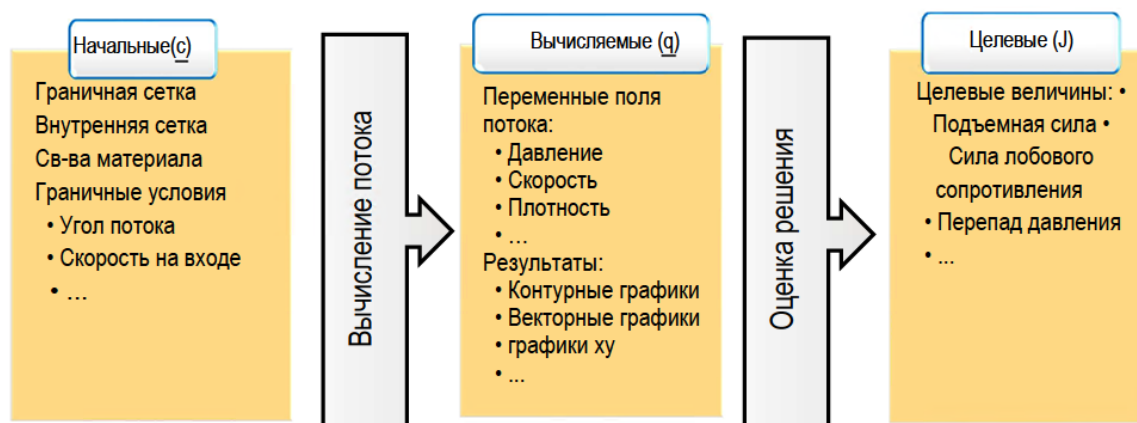


Рисунок 4.1. Порядок CFD-расчета (составлено авторами)

Figure 4.1. CFD calculation procedure (compiled by the authors)

Затем из перечня полученных данных определяются целевые параметры (J). В рамках решения задачи оптимизации формы контура SFT они являются функциями цели $J(q(c), c)$ [15] (рис. 4.2).

На следующем этапе производятся решение сопряженной задачи, результатом которой является оценка чувствительности целевого параметра к изменению областей исследуемого контура. Необходимо отметить, что эту информацию можно использовать при улучшении конструкции вручную, таким образом сопроводив процесс оптимизации. В ином случае можно воспользоваться автоматической деформацией текущей сетки.

Таким образом процесс оптимизации выполняется посредством ряда итераций, количество которых зависит непосредственно от целей, которые ставит перед собой исследователь.

4.2 Основные уравнения

4.2 Basic Equations

Математическая основа градиентной оптимизации состоит в следующем:

1. Начальные условия и вычисляемые параметры связаны следующим образом (рис. 4.1):

c — функционал начальных параметров участвующих в оптимизации;
 q — функционал вычисляемых параметров участвующих в оптимизации;

$J(q(c), c)$ — функционал цели, минимизация которого является целью оптимизации;

$R_i(q(c), c)$ — остаточный вектор, представляющий собой разницу между прогнозируемым выходом модели и фактическим выходом данных по уравнению Навье-Стокса.

2. Чувствительность решения определяется следующим уравнением:

$$\frac{dJ}{dc} = \frac{\partial J}{\partial c} + \tilde{q}^T \frac{\partial R}{\partial c}, \quad (4.1)$$

где $\frac{dJ}{dc}$ — общая чувствительность функционала параметров модели (c);
 $\frac{\partial J}{\partial c}$ — градиент функционала цели по отношению к параметрам модели (c);
 $\tilde{q}^T \frac{\partial R}{\partial c}$ — произведение транспонированного присоединенного вектора и градиента остаточного вектора (R) по отношению к параметрам модели (c); $\tilde{q}$ — решение (сопряженной) задачи $\left[\frac{\partial R}{\partial q}\right]^T \tilde{q} = -\left[\frac{\partial J}{\partial q}\right]^T$.

Методология решения представлена ниже:

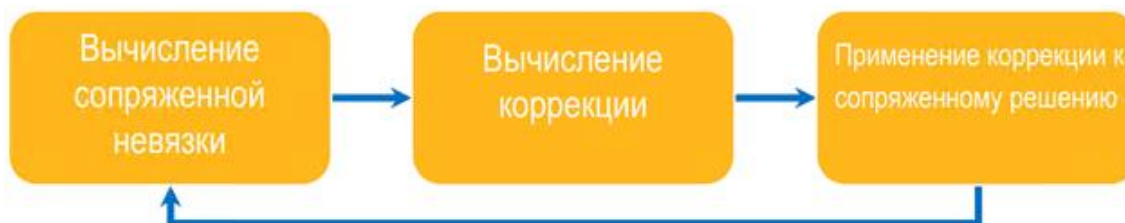


Рисунок 4.2. Методология решения задачи оптимизации (составлено авторами)

Figure 4.2. Methodology for solving an optimization problem (compiled by the authors)

1. Вычисление вектора обновления для i -го параметра q :

$$\check{R} = \frac{\partial J}{\partial q_i} - \frac{\partial R_i}{\partial q_i} \check{q}_i. \quad (4.2)$$

2. Вычисление коррекции к сопряженному решению:

$$M \Delta \check{q}_i = \frac{\partial J}{\partial q_i} - \frac{\partial R_i}{\partial q_i} \check{q}_i = \check{R}, \quad (4.3)$$

где M — матрица Гессе; $\Delta \check{q}_i$ — вектор обновления для i -го параметра q , который определяется путем умножения обратной матрицы Гессе на вектор обновления $\check{R}$; $\check{q}_i$ — текущее значение i -го параметра.

3. Применение коррекции к сопряженному решению:

$$\check{q}_i \leftarrow \check{q}_i + \alpha \Delta \check{q}_i. \quad (4.4)$$

4. Выполнение данной последовательности до достижения невязками заданного порогового значения (пределов сходимости) или до достижения максимального количества итераций.

4.3 Применение

4.3 Application

Для оптимизации принимается контур, рассмотренный ранее в приложении аналитической модели оценки воздействия течения на SFT (п. 0). Также принимались во внимания независимы результаты исследования с этими же параметрами, представленные в статье [16].

Задачей оптимизации является снижение лобового сопротивления контура на 20 %. При общем лобовом сопротивлении 161,81 кН/м целевое значение составляет 129,45 кН/м.

При условии сохранения симметрии и равномерности контур при его оптимизации произошла трансформация кольцевого сечения в эллиптическое:

$$\begin{cases} x = r \cos(t) \\ y = r \sin(t) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} x = a \cos(t) \\ y = b \sin(t) \end{cases} \quad (4.5)$$

где r — внешний радиус исходного контура, $r = \frac{D}{2} = \frac{27}{2} = 13,5$ м; a — большая (горизонтальная) полуось оптимизированного контура, $a = \frac{D}{2} = \frac{27}{2} = 13,5$ м; b — малая (вертикальная) полуось оптимизированного контура, $b = 12,75$ м.

Таким образом ширина контура поперек потока (высота контура) уменьшилась на 1,5 м, ($27 \text{ м} \rightarrow 25,5 \text{ м}$).

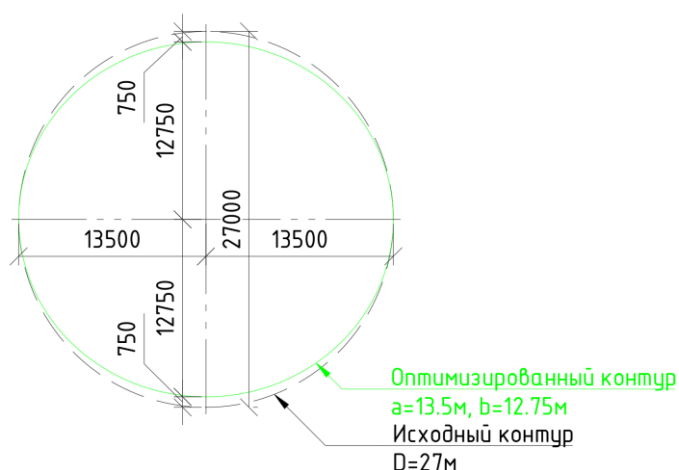


Рисунок 4.3. Трансформация контура для снижения лобового сопротивления F_D на 20 % (составлено авторами)

Figure 4.3. Contour transformation to reduce F_D drag force by 20 % (compiled by the authors)

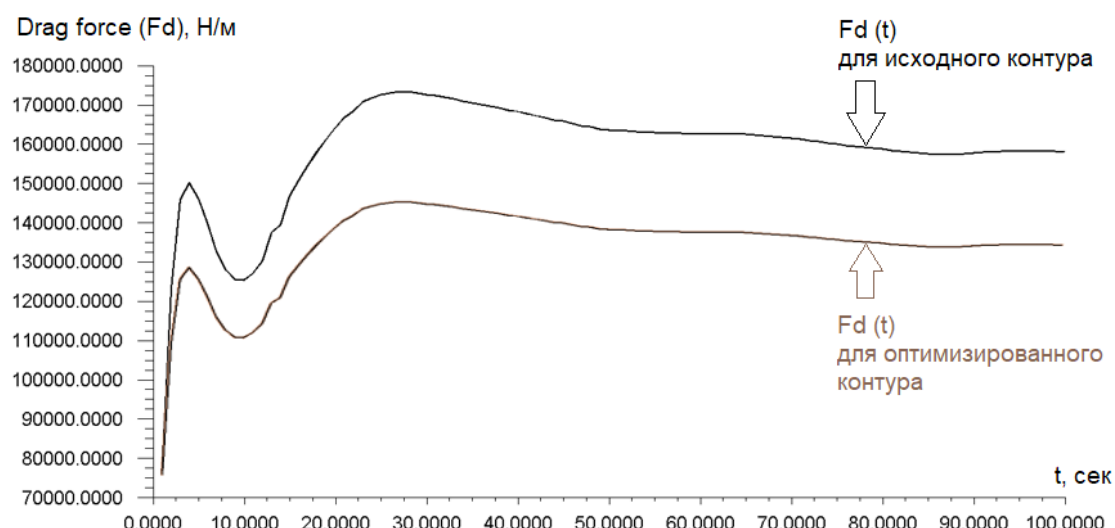


Рисунок 4.4. График изменения сил лобового сопротивления во временной области для исходного кругового и оптимизированного контура SFT (составлено авторами)

Figure 4.4. Diagram of drag forces variance for the original circular and optimized SFT contour (compiled by the authors)

В результате изменения формы контура происходит изменение распределения давления по нему. На представленной диаграмме (рис. 4.4) лобовое сопротивление, а, значит, горизонтальная поперечная нагрузка на сооружение снижена на 20 %. Столь существенное снижение лобового сопротивления контура после его трансформации объясняется уменьшением длины пограничного слоя по контуру, следовательно, сужение спутной струи, образующейся за ним при обтекании.

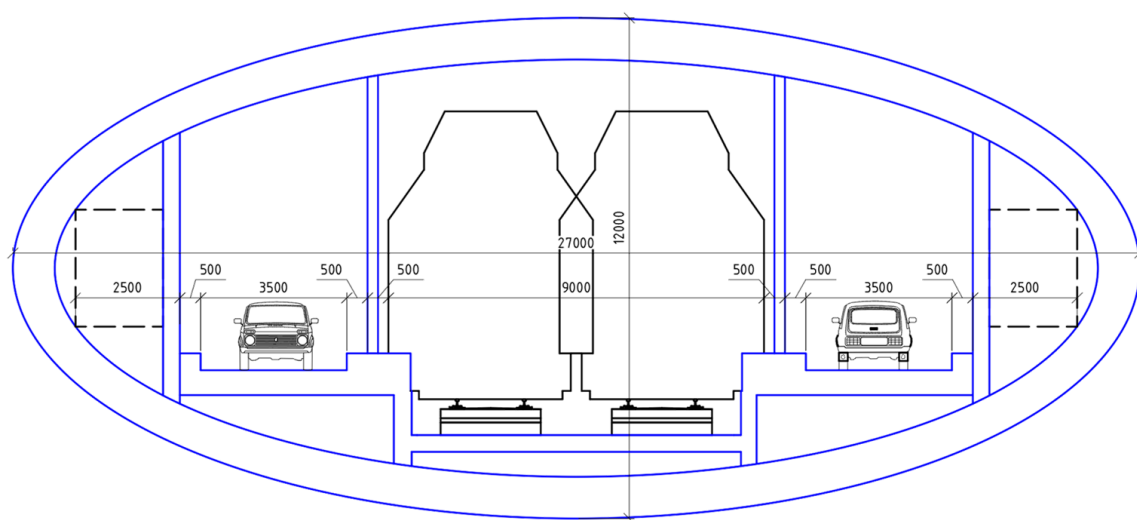


Рисунок 4.5. Оптимизированный контур с учетом конструктивных и эксплуатационных ограничений (составлено авторами)

Figure 4.5. Optimized contour taking into account design and operational constraints (compiled by the authors)

Полная минимизация лобового сопротивления должна учитывать соблюдение определенных ограничений. Первые ограничения связаны с сохранением необходимой изгибной жесткости сечения SFT для соблюдения требований расчета по прочности. Вторые ограничения связаны и эксплуатационными требованиями, предъявляемыми к будущей конструкции. Это касается соблюдения требований к габаритам приближения строений для проектируемых тоннелей в соответствии с СП 35.13330.2011 и ГОСТ 24451-80.

Более радикальным решением представляется сечение эллиптической формы (рис. 4.5).

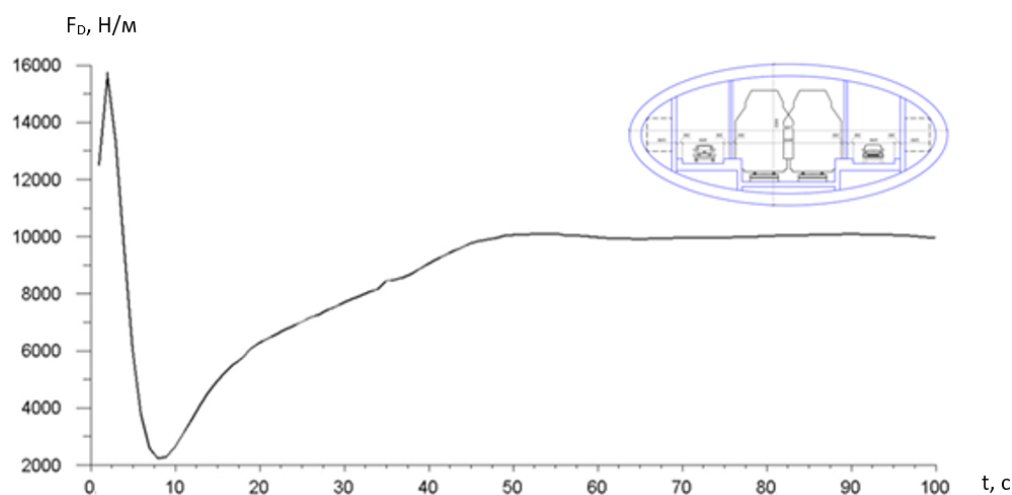


Рисунок 4.6. График изменения сил лобового сопротивления для оптимизированного контура (см. рис. 4.5) (составлено авторами)

Figure 4.6. Diagram of changes in drag forces for the optimized contour (see fig. 4.5) (compiled by the authors)

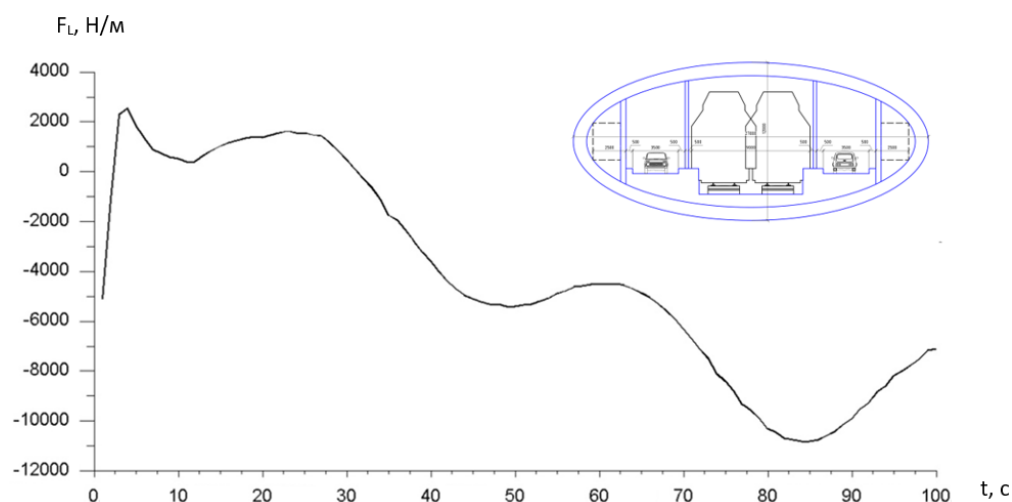


Рисунок 4.7. График изменения подъемных сил для оптимизированного контура (составлено авторами)

Figure 4.7. Diagram of changes in ascending forces for the optimized contour (compiled by the authors)

Изменение значений лобового сопротивления (рис. 4.6) во временной области численного моделирования от 0 до 50 с обусловлено влиянием нулевых начальных условий модели, затем значения стабилизируются (9 988 Н/м). Таким образом после оптимизации контура секции SFT лобовое сопротивление снизилось по сравнению исходным кольцевым сечением в ~ 13 раз.

На диаграмме (рис. 4.7) наблюдается изменение подъемной силы в направлении, противоположном силе тяжести. График имеет характер, близкий к периодическому, но в силу небольшой величины диапазона значений и асимптотической устойчивости это может стать причиной лишь незначительных колебаний конструкции в поперечном направлении.

Вывод

Conclusion

В рамках данной задачи была выполнена оптимизация круговой формы контура посредством специализированного программного комплекса для CFD-расчета. Показана возможность снижения лобового сопротивления не менее чем на 20 % при незначительных отклонениях от начальной круговой формы.

Применение эллиптической формы сечения тоннеля снижает лобовое сопротивление потоку многократно (~ 13 раз) по сравнению с круговым сечением, что позволяет судить о многократном снижении горизонтальной поперечной нагрузки на сооружение. Также полученный эллиптический контур учитывает конструкционные ограничения, связанные с необходимостью сохранения достаточной изгибной жесткости балки и эксплуатационные ограничения, связанные с соблюдением габаритов приближения строений для заявленных видов а/д и ж/д транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ding, H.** Enlightenment to Floating Tunnel of Existing Typical Submerged Tunnel / H. Ding, Q. Li, S. Jiang, K. Li. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.560> // Procedia Engineering. — 2016. — Т 166. — С. 355–361. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581633884X> (дата обращения: 11.04.2023).
2. **Поляков, В.Ю.** Современные подходы к исследованию разработке подводных плавающих сооружений / В.Ю. Поляков, И.В. Хорев, И.М. Демидов DOI <https://doi.org/10.15862/08SATS322> // Транспортные сооружения. — 2022. — Т 9. — № 3. — URL: <https://t-s.today/PDF/08SATS322.pdf> (дата обращения: 11.04.2023).

3. **Minoretti, A.** The Future of the Tunnel Crossing: The Submerged Floating Tube Bridge / A. Minoretti, X. Xiang, I.L. Johansen, M. Eidem. — DOI <https://doi.org/10.1080/10168664.2020.1775165> // Structural Engineering International. — 2020. — Т 30. — № 4. — С. 493–497. — URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10168664.2020.1775165> (дата обращения: 11.04.2023).
4. **Jin, C.** Dynamic Responses of a Submerged Floating Tunnel in Survival Wave and Seismic Excitations / C. Jin, J. Lee, H. Kim, M. Kim // Proceedings of the The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference, San Francisco, CA, USA, 25–30 June 2017 / Сан-Франциско: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2017. — С. 547–551. — URL: <https://onepetro.org/ISOPEIOPEC/proceedings-abstract/ISOPE17/All-ISOPE17/ISOPE-I-17-613/18247> (дата обращения: 11.04.2023).
5. **Gyu-Jin, K.** Three-dimensional equivalent static analysis for design of submerged floating tunnel / K. Gyu-Jin, K. Hyo-Gyoung, J. Chungkuk, K. HeonYong, C. WooChul. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2021.103080> // Marine Structures. — 2021. — Т 80. — С. 103080. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951833921001349> (дата обращения: 11.04.2023).
6. **Ahrens D.** Chapter 10 submerged floating tunnels a concept whose time has arrived / D. Ahrens. — DOI [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(97\)90022-5](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(97)90022-5) // Tunnelling and Underground Space Technology. — 1997. — Т 12. — № 2. — С. 317–336. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0886779897900225> (дата обращения: 11.04.2023).
7. **Chakrabarti, S.K.** Hydrodynamics of Offshore Structures / S.K. Chakrabarti. — Плейнфилд: WIT Press, 1987. — 440 с.
8. **Won, D.** Hydrodynamic Behavior of Submerged Floating Tunnels with Suspension Cables and Towers under Irregular Waves / D. Won, J. Seo, S. Kim, W-S. Park. — DOI <https://doi.org/10.3390/app9245494> // Applied Sciences. — 2019. — Т 9. — № 24. — С. 5494. — URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/24/5494> (дата обращения: 24.04.2023).
9. **Journée, J.M.** Offshore Hydromechanics. 1st ed. / J.M. Journée, W.W. Massie. — Delft University of Technology, 2001. — 16 с. — URL: https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Introduction_Offshore_Hydromechanics.pdf (дата обращения: 24.04.2023).
10. **Schlichting, H.** Boundary-Layer Theory / H. Schlichting. — Нью-Йорк McGraw-Hill, 1979. — 817 с.
11. **Симну, Э.** Воздействие ветра на здания и сооружения / Э. Симну, Р. Сканлан. — М.: Стройиздат, 1984. — 358 с.
12. **Temple, G.** Collected works of Theodore von Karman / G. Temple. — DOI <https://doi.org/10.1017/S0022112059210234> // Journal of Fluid Mechanics. — 1959. — Т 5. — № 2. — С. 329–336. — URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-fluid-mechanics/article/abs/collected-works-of-theodore-von-karman/C06EE64C2FF64FF0F4AEC84A9857C0A4> (дата обращения: 24.04.2023).
13. **Brandt, P.** Internal Waves in the Strait of Messina Studied by a Numerical Model and Synthetic Aperture Radar Images from the ERS 1/2 Satellites / P. Brandt, A. Rubino, W. Alpers, J. O. Backhaus. — DOI [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1997\)027%3C0648:IWITSO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1997)027%3C0648:IWITSO%3E2.0.CO;2) // Journal of Physical Oceanography. — 1997. — С. 648–663. — URL: https://journals.ametsoc.org/view/journals/phoc/27/5/1520-0485_1997_027_0648_iwitso_2.0.co_2.xml (дата обращения: 24.04.2023).
14. **Thevenin, D.** Optimization and Computational Fluid Dynamics / D. Thevenin, G. Janiga. — DOI <https://doi.org/10.1007/978-3-540-72153-6>. — Берлин: Springer-Verlag, 2008. — 294 с. — URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-72153-6> (дата обращения: 24.04.2023).
15. **Печеник, Е.В.** Оптимизация симметричного профиля методом сопряженного градиента / Е.В. Печеник // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2011. — Т 13. — № 1-2. — С. 330–333. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17305008>. — EDN OORVGH. (дата обращения: 24.04.2023).

16. **Mandara, A.** Analysis of Fluid-structure Interaction for a Submerged Floating Tunnel / A. Mandara, E. Russo, B. Faggiano, F.M. Mazzolani. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.572> // Procedia Engineering. — 2016. — Т 166. — С. 397–404. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816338966> (дата обращения: 24.04.2023).

Сведения об авторах:

Поляков Владимир Юрьевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Мосты и тоннели», ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия, e-mail: pyu55@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6160-601X>
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/AAS-4866-2021>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57201723559>

Хорев Игорь Владимирович — аспирант кафедры «Мосты и тоннели», ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия, e-mail: rasman.ih72@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8685-9251>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1186811

Статья получена: 24.06.2023. Принята к публикации: 29.09.2023. Опубликовано онлайн: 07.10.2023.

REFERENCES

1. Ding H., Li Q., Jiang S., Li K. Enlightenment to Floating Tunnel of Existing Typical Submerged Tunnel. *Procedia Engineering*. 2016; 166: 355–361. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.560>.
2. Poliakov V.Yu., Khorev I.V., Demidov I.M. Modern approaches to research and development of underwater floating constructions. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2022; 9(3). (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15862/08SATS322>.
3. Minoretta A., Xiang X., Johansen I.L., Eidem M. The Future of the Tunnel Crossing: The Submerged Floating Tube Bridge. *Structural Engineering International*. 2020; 30(4): 493–497. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/10168664.2020.1775165>.
4. Jin C., Lee J., Kim H., Kim M. Dynamic Responses of a Submerged Floating Tunnel in Survival Wave and Seismic Excitations. In: *Proceedings of the The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference, San Francisco, CA, USA, 25–30 June 2017*. San Francisco: International Society of Offshore and Polar Engineers; 2017. p. 547–551. Available at: <https://onepetro.org/ISOPEIOPEC/proceedings-abstract/ISOPE17/All-ISOPE17/ISOPE-17-613/18247> (accessed 11th April 2023). (In Eng.).
5. Gyu-Jin K., Hyo-Gyoung K., Chungkuk J., HeonYong K., WooChul C. Three-dimensional equivalent static analysis for design of submerged floating tunnel. *Marine Structures*. 2021; 80: 103080. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2021.103080>.
6. Ahrens D. Chapter 10 submerged floating tunnels — a concept whose time has arrived. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 1997; 12(2): 317–336. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(97\)90022-5](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(97)90022-5).
7. Chakrabarti S.K. Hydrodynamics of Offshore Structures. Plainfield: WIT Press; 1987. (In Eng.).
8. Won D., Seo J., Kim S., Park W-S. Hydrodynamic Behavior of Submerged Floating Tunnels with Suspension Cables and Towers under Irregular Waves. *Applied Sciences*. 2019; 9(24): 5494. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/app9245494>.
9. Journée J.M., Massie W.W. Offshore Hydromechanics. 1st ed.: Delft University of Technology; 2001. Available at: https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Introduction_Offshore_Hydromechanics.pdf (accessed 24th April 2023). (In Eng.) DOI:
10. Schlichting H. Boundary-Layer Theory. New York: McGraw-Hill; 1979. (In Eng.).
11. Simiu E., Scanlan R.H. Wind effects on structures: an introduction to wind engineering. New York: John Wiley & Sons; 1978. (In Eng.).

12. Temple G. Collected works of Theodore von Karman. *Journal of Fluid Mechanics*. 1959; 5(2): 329–336. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112059210234>.
13. Brandt P., Rubino A., Alpers W., Backhaus J.O. Internal Waves in the Strait of Messina Studied by a Numerical Model and Synthetic Aperture Radar Images from the ERS 1/2 Satellites. *Journal of Physical Oceanography*. 1997; 648–663. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1997\)027%3C0648:IWITSO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1997)027%3C0648:IWITSO%3E2.0.CO;2).
14. Thevenin D., Janiga G. Optimization and Computational Fluid Dynamics. Berlin: Springer-Verlag; 2008. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-72153-6> (accessed 24th April 2023). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-72153-6>.
15. Pechenik E.V. Optimization of the Symmetric Profile by Conjugated Gradient Method. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2011; 13(1-2): 330–333. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17305008> (accessed 24th April 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
16. Mandara A., Russo E., Faggiano B., Mazzolani F.M. Analysis of Fluid-structure Interaction for a Submerged Floating Tunnel. *Procedia Engineering*. 2016; 166: 397–404. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.572>.

Information about the authors:

Vladimir Yu. Poliakov — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, e-mail: pyy55@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6160-601X>
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/AAS-4866-2021>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57201723559>

Igor V. Khorev — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, e-mail: pacman.ih72@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8685-9251>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1186811

Submitted: 24th June 2023. Revised: 29th September 2023. Published online: 7th October 2023.