

ТРУДЫ

КРЫЛОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК 2 | 2019

TRANSACTIONS

OF THE KRYLOV STATE RESEARCH CENTRE



КРЫЛОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАУЧНЫЙ ЦЕНТР



ISSN 2542-2324
E-ISSN 2618-8244

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
SAINT-PETERSBURG

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Задача журнала состоит в публикации и распространении результатов оригинальных современных исследований в сфере судостроения и кораблестроения, в том числе сопровождающихся результатами эксперимента. Цель журнала – создание международной площадки для публикаций, образующих комплексный научно-технический задел в судостроении и популяризирующих уникальные достижения в данной области. В дополнение к уникальным исследованиям журнал публикует обзорные и научно-методические статьи. Все статьи проходят тщательное рецензирование.

AIM AND SCOPES

The purpose of the journal is to publish and disseminate the results of advanced research studies related to shipbuilding, including full-scale and model experimental data. The journal is envisioned as an international platform for publications which are expected to promote the shipbuilding science and engineering progress as well as to spread the word about unique developments in this field. In addition to covering unique research studies the journal is publishing state-of-the art reviews and scientific papers. All papers are peer reviewed.

Труды Крыловского государственного научного центра. СПб., 2019. 296 с.: ил.
Специальный выпуск, № 2. 2019

Transactions of the Krylov State Research Centre
Special issue 2. 2019

<http://www.transactions-ksrc.ru>

© ФГУП «Крыловской государственной научный центр», 2019

Главный редактор

Филиппов П.В., д.т.н., профессор, и.о. генерального директора
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Пешехонов В.Г., д.т.н., действительный член РАН,
профессор, генеральный директор ГНЦ РФ АО
«Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург

Якушенко Е.И., д.т.н., действительный член РАН,
профессор, начальник Военно-морского
политехнического института Военного
учебно-научного центра (ВУНЦ) ВМФ «Военно-морская
академия имени Адмирала Флота Советского Союза
Н.Г. Кузнецова», Санкт-Петербург

Пустошный А.В., д.т.н., член-корреспондент РАН,
главный научный сотрудник-консультант
ФГУП «Крыловский государственный
научный центр», Санкт-Петербург

Йошенг Ву, профессор Китайского судостроительного
научно-исследовательского центра, член Китайской
академии машиностроения, Уси, Китай

Марченко А.В., д.т.н., профессор Свальбардского
международного университета, Норвегия

Корнев Н.В., д.т.н., профессор Университета Ростока,
Германия

Половинкин В.Н., д.т.н., профессор, научный
руководитель ФГУП «Крыловский государственный
научный центр», Санкт-Петербург

Ярцев Б.А., д.т.н., начальник сектора
ФГУП «Крыловский государственный
научный центр», Санкт-Петербург

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Теория корабля и строительная механика

Сазонов К.Е., д.т.н., ответственный за направление

Каневский Г.И., д.т.н.

Шапошников В.М., к.т.н.

Дульнев А.И., д.т.н.

Александров А.В., к.т.н.

Таранов А.Е., к.т.н.

Проектирование и конструкция судов

Орлов О.П., д.т.н., профессор, ответственный
за направление

Крыжевич Г.Б., д.т.н., профессор

Тряскин В.Н., д.т.н., профессор СПбГМТУ

Судовые энергетические установки

Хорошев В.Г., д.т.н., ответственный за направление

Иванов Р.А., д.т.н., профессор

Кучин Н.Л., д. ф.-м.н.

Аваков В.Б., к.т.н.

Судовая электротехника

Цицикян Г.Н., д.т.н., ответственный за направление

Кузнецов С.Е., д.т.н., профессор ГМА

им. адм. С.О. Макарова

Дмитриев Б.Ф., д.т.н., профессор СПбГМТУ

Физические поля корабля

Вишневский А.М., д.т.н., профессор, ответственный
за направление

Городецкий Б.Н., д.т.н.

Попков С.В., д.т.н.

Мальшев О.В., к.т.н.

Эйдук В.И., к.т.н.

Лаповок А.Я., к.т.н.

Патраков Ю.Н., к.т.н.

Калью В.А., к.т.н.

Благовидова И.Л., Иванова О.А., Науменко А.А., Пьянов А.В. Численное моделирование процесса позиционирования сложных плавучих объектов при выполнении морских операций.....	Blagovidova I.L., Ivanova O.A., Naumenko A.A., Pyanov A.V. Numerical simulation of positioning process for complex floating objects during marine operations	239	239
Валяев А.В. О разработке системы поддержки принятия решений при угрозе затопления речного водоизмещающего судна	Valyaev A.V. On development of flooding response support system for river-going displacement vessel	248	248
Грамузов Е.М., Иванова О.А., Крамарь В.А., Родькина А.В. Гибридная нейронная сеть для прогнозирования защитного потенциала подводной части океанотехнических сооружений.....	Gramuzov Ye.M., Ivanova O.A., Kramar V.A., Rodkina A.V. Hybrid neural network enabling protection potential prediction for underwater parts of marine platforms	254	254
Ермолаев Э.В., Махов В.И. Анализ работы и расчет пьезокерамического стержня с накладкой при использовании конечно-элементного моделирования	Yermolaev E.V., Makhov V.I. FEM-based calculation and operation analysis of padded piezoceramic rod	263	263
Клюев В.А., Шкуратов Н.Г. Опыт применения отечественных операционных систем на базе linux в современных многофункциональных телевизионных комплексах	Shkuratov N.G., Klyuev V.A. Application experience of Russian LINUX-based OS in modern multi-functional TV systems.....	269	269
Кулебакин А.И. Исследование влияния импульсных характеристик электроакустических преобразователей на качество звуковоспроизведения	Kulebakin A.I. Pulse characteristics of loud-speakers and their effect on audio reproduction fidelity	272	272
Хмельницкая К.А. Распознавание пламени с помощью оптоэлек-тронных систем в судостроении	Khmelnitskaya K.A. Optoelectronic systems for flame recognition in shipbuilding.....	277	277
Рогозина К.С. Анализ критериев механизации и автоматизации производственных процессов	Rogozina K.S. Analysis of mechanization and automation criteria for production processes	282	282
Сутормин В.В., Шилина Е.С. Исследование обнаружителей с постоянным уровнем ложной тревоги.....	V.V. Sutormin, Ye.S. Shilina A study on CFAR detectors	287	287

А.А. Науменко, И.Л. Благовидова, А.В. Пьянов, О.А. Иванова
АО «ЦКБ Коралл», Севастополь, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ПЛАВУЧИХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ МОРСКИХ ОПЕРАЦИЙ

Целью работы является численное моделирование всех этапов морских операций при погрузке и подъеме арочных пролетных строений с плавучей системы на стационарные опоры Керченского моста, разработка системы позиционирования, способной обеспечить безопасность выполнения всех этапов операции под воздействием внешних нагрузок. В основу решения поставленной задачи положено математическое моделирование морских операций с помощью программного комплекса *Anchored Structures*. Определены параметры системы позиционирования с обеспечением необходимой точности к положению плавопор, входящих в состав плавсистемы при выполнении технологических операций. На основании результатов расчетного анализа найдены оптимальные параметры лебедок и якорных канатов системы позиционирования с последующей установкой их на плавучие опоры; решены вопросы по обеспечению плавучих опор кранцевой защитой; определены величины продольно-поперечных колебаний и параметров качки плавучих опор и плавсистемы в целом при воздействии волнения. Выполненный расчетный анализ позволил выбрать параметры системы позиционирования, с помощью которой были успешно завершены морские операции по установке пролетных арочных строений Керченского моста на капитальные опоры в фарватере. Выбранные при помощи численного моделирования операции параметры лебедок и канатов обеспечили требуемую точность при позиционировании и позволили выполнить погрузку пролетных строений на проектные точки опирания. Результаты численного моделирования в программном комплексе *Anchored Structures* дали высокую сходимость результатов расчетов с реальными процессами.

Ключевые слова: моделирование, система позиционирования, нагрузка, якорные связи.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

A. Naumenko, I. Blagovidova, A. Pyanov, O. Ivanova
JSC CDB Korall, Sevastopol, Russia

NUMERICAL SIMULATION OF POSITIONING PROCESS FOR COMPLEX FLOATING OBJECTS DURING MARINE OPERATIONS

The purpose of this work is to numerically simulate all the stages of marine operations involved in loading and erection of the Crimean bridge spans from the floating system to stationary supports, as well as to develop a positioning system enabling safe completion of these technical operations under external loads. The solution to this problem is based on numerical simulation of marine operations in *Anchored Structures* software package. The study determines the parameters for positioning systems enabling required positioning accuracy of floating system supports during technological op-

Для цитирования: 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; Специальный выпуск 2: 239–247.

For citations: Naumenko A., Blagovidova I., Pyanov A., Ivanova O. Numerical simulation of the positioning process of complex floating objects when performing offshore operations. Transactions of the Krylov State Research Center. 2019; Special Edition 2: 239–247 (*in Russian*).

erations. The calculation yielded optimal parameters for positioning system winches and mooring ropes to be installed onto transportation pontoons; it also ensured protection of these pontoons by fenders and yielded surge magnitudes and parameters for the whole floating system and its pontoons in waves. This analysis yielded optimal parameters for the positioning system, thus ensuring successful float-over of the Crimean bridge spans onto their permanent supports. The parameters of winches and ropes yielded by the numerical simulation ensured required accuracy of positioning and successful installation of the spans. Simulation results obtained in *Anchored Structures* software package were quite close to actual physical parameters.

Keywords: simulation, positioning system, load, mooring lines.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

Введение

Introduction

В программном комплексе *Anchored Structures* авторским коллективом сотрудников АО «ЦКБ Коралл» неоднократно проводилось моделирование морских операций по различным проектам, например:

- по проекту обустройства месторождения (далее – м-р) им. Ю. Корчагина в северной части Каспийского моря выполнен анализ системы удержания для постановки на точку бурения морской ледостойкой платформы ЛСП-1;
- в составе проекта морских операций по обустройству м-р им. В. Филановского в северной части Каспийского моря выполнен анализ систем удержания при постановке на точку бурения опорных блоков морских ледостойких платформ ЛСП-2 и ПЖМ-2;
- выполнен анализ поведения баржи «ТМБ» при забивке свай для морских ледостойких платформ ЛСП-2 и ПЖМ-2 на м-р им. В. Филановского;
- проанализированы работы по подъему плавкрана «Волгарь» на понтонах «МарГон» с целью проведения операции по обследованию и ремонту подводной части корпуса на территории завода Астраханское Судостроительное Производственное Объединение (далее – АСПО);
- выполнена оценка системы удержания понтонов «МарГон» при сборке на палубе и спуске на воду СПБУ «Нептун» и «Меркурий» на территории завода АСПО.
- Помимо морских операций программный комплекс использовался для определения:
- параметров системы удержания турельного типа для перспективной плавучей буровой установки, предназначенной для бурения разведочных и эксплуатационных скважин в тяжелых ледовых условиях глубоководного арктического шельфа Российской Федерации;
- параметров качки плавкранов «Волгарь» и «Богатырь» во время грузовых операций с крупно-

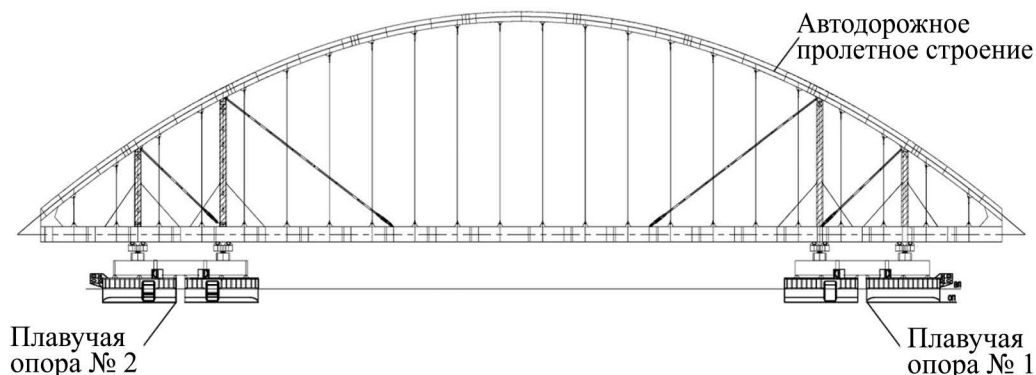
габаритными и тяжеловесными грузами при обустройстве различных нефтегазовых месторождений в Каспийском и Черном морях;

- параметров качки баржи «ТМБ» при различных вариантах эксплуатации (при перевозке грузов и в крановом режиме);
- нагрузок на плавучие и стационарные объекты от действия ветра, волнения и течения на различные типы сооружений, предназначенные для эксплуатации в Обско-Тазовской губе, Балтийском, Карском, Черном и Каспийском морях.
- достаточности систем удержания и позиционирования при постановке на различные точки эксплуатации СПБУ «Арктическая», «Нептун» и «Меркурий».

В течение 2016–2017 гг. АО «ЦКБ «Коралл» были проведены работы по проектированию морской операции по транспортировке пролетных строений Керченского моста. При этом одной из основных задач являлось обеспечение позиционирования, с жесткими условиями по точности, плавучей системы в момент передачи тяжелого крупногабаритного арочного строения со стапеля на плавсистему и его подъем с плавучей системы на стационарные опоры моста. С учетом большой ответственности систем позиционирования, принимаемые решения базировались на подробном математическом моделировании всех морских операций с помощью специализированного программного комплекса *Anchored Structures*, разработанного в Санкт-Петербургском Политехническом университете. Анализ данных, полученных при строительстве и производстве морских операций, показал, что выполненный в программном комплексе *Anchored Structures* расчетный анализ имеет очень хорошую сходимость с реальными процессами. Следовательно, применение методов математического моделирования для решения такого рода задач позволяет прогнозировать поведение и безопасность системы позиционирования, а в условиях реализации проекта осуществлять полный контроль над процессом.

Рис. 1. Общий вид плавсистемы с автодорожным пролетным строением

Fig. 1. General view of the floating system with road bridge span



Проектные работы по строительству моста через Керченский пролив начались в 2014 г. Мост представляет собой длинную эстакаду с пролетами от 54,2 до 64,2 м, а Керчь-Еникальский канал перекрывается арками (по одной на авто- и железнодорожном мостах; являются самой крупной металлоконструкцией моста) длиной 227 м и высотой 45 м с подмостовым судоходным габаритом высотой 35 м и шириной 185 м.

Установка судоходного пролета (арочных пролетных строений), согласно проекту должна была выполняться с помощью понтонной плавучей системы. Перевозка на плаву арочных пролетных строений обеспечивается на двух плавучих опорах (рис. 1), каждая из которых состоит из двух понтонов, отстоящих друг от друга на расстоянии 2,0 м и соединенных между собой специальной металлоконструкцией (обстройкой). Плавучая опора № 1 сформирована из понтонов № 3 и № 4. Плавучая опора № 2 сформирована из понтонов № 1 и № 2. Каждый понтон имеет следующие размеры:

- длина – 60,2 м;
- ширина – 16,5 м;
- высота борта понтона – 5,0 м;
- осадка расчетная плавучей системы с ж/д пролетным строением – 3,04 м;
- осадка расчетная плавучей системы с а/д пролетным строением – 3,00 м.

На плавучие опоры с берегового стапеля погружался судоходный пролет (автодорожное или железнодорожное арочное пролетное строение) и буксировался к месту установки. Затем осуществлялся его подъем и установка на стационарные опоры Крымского моста [1].

Ввиду податливости плавучих опор при воздействии внешних нагрузок плавучая система вместе с установленным на ней арочным пролетным строением совершала колебания, которые могли привести к аварийной ситуации. Сложность проведения морской операции обусловлена массогабаритными

характеристиками плавучей системы. Для успешного завершения главного этапа строительства моста – установки пролетных арочных строений на мостовые опоры – огромное значение имело правильное определение параметров системы позиционирования, обеспечивающей выполнение технологических операций, связанных с перемещением плавучих опор по отдельности и плавучей системы в целом [1].

Методология решения задачи

Problem Solving Methodology

Для определения внешних нагрузок на исследуемые объекты в программном комплексе была разработана трехмерная модель плавсистемы.

Расчетный анализ, выполненный в программном комплексе Anchored Structures, включает все этапы проведения морской операции при условном их разделении. На первом этапе работы проводились у стапеля в акватории «ковша» (искусственно углубленной части морской акватории). В этот этап входила балластировка плавучих опор, заведение и удержание их под пролетным арочным строением с помощью канатов системы позиционирования; дебалластировка плавучих опор и прием веса пролетного арочного строения; выведение плавучей системы на ось подходного канала и швартовка к свайным якорям на период формирования буксирного ордера.

На втором этапе проводилась транспортировка плавучей системы из акватории «ковша» по подходному каналу и далее по Керченскому подходному и Керчь-Еникальскому каналам к месту монтажа арочных пролетных строений.

Третий этап можно классифицировать как заключительный. Его работы включали позиционирование и монтаж пролетных строений в створе моста, а именно: постановку плавучей системы на свайные якоря в створе моста, позиционирование в створе моста и подъем арочного пролетного строения.

Математическое моделирование выполнялось для каждого этапа проведения морских операций при различном моделировании вариантов внешних нагрузок от течения, ветра и волнения.

При анализе поведения плавсистемы предварительно была выполнена оценка ее устойчивости, расчет восстанавливающих моментов производился методом интегрирования гидростатического давления жидкости по смоченной поверхности сооружения относительно его центра тяжести; выполнен расчет волновых нагрузок. В общем случае волнение представляется одним из известных спектров волнения JONSWAP, который моделируется как совокупность элементарных гармоник с рассчитываемой амплитудой, частотой и случайной фазой. Спектр задается с помощью двух параметров: среднего периода волнения и высоты волны заданной обеспеченности, для расчетов принята высота волны 3 %-ной обеспеченности, которая составила в «ковше» до 0,5 м, в «створе» моста – до 1,0 м [1].

При моделировании задач статики производилось решение системы нелинейных алгебраических уравнений, представляющих собой баланс всех сил, действующих на сооружение в каждой из степеней свободы.

При моделировании задач динамики выполнялось численное решение нелинейных дифференциальных уравнений движения системы «плавучие опоры – пролетное строение» с учетом внешних нагрузок, реакции связей и отбойных устройств.

Вектор волновой нагрузки на сооружение в 6 степенях свободы $F_w(t) = (F_{w1}, F_{wj}, F_{w6})$, зависящий от времени, определяется в этом случае как суперпозиция нагрузок отдельных составляющих спектра:

$$F_w(t) = \sum_{i=1}^N F_{wi}(\omega_i) \sin(\omega_i t + \varphi_i), \quad (1)$$

где F_{wi} – вектор амплитуд нагрузок и моментов от i -й гармоники спектра волнения; t – время; ω_i – круговая i -й гармоники; φ_i – фаза i -й гармоники спектра нагрузки; N – число гармоник.

Для решения задачи динамического поведения плавучих опор, на которые опирались пролетные строения, на основе гидродинамической теории качки в программном комплексе выполнялось определение вектора волновых нагрузок F_w и гидродинамических параметров сооружения (λ – матрицы присоединенных масс и B – матрицы коэффициентов волнового сопротивления) для каждой конкретной частоты спектра волнения. Для получения значений этих параметров для различных частот использовался

метод гидродинамических особенностей – метод пространственных источников излучения, основанный на получении набегающего и отраженного потенциалов волнения и интегрировании результирующих давлений жидкости по смоченной поверхности сооружения.

При расчете нагрузок от течения, заданного с помощью скорости $V_c(z)$ и направления α_c , сила F_c , действующая на плавучие опоры, находилась по формуле

$$F_c = \frac{1}{2} \rho_w \int_z V_c^2 A_c(\alpha_c, z) C_c(\alpha_c, z) dz, \quad (2)$$

где $A_c(\alpha_c, z)$ и $C_c(\alpha_c, z)$ – функции эквивалентной площади сечения подводной части и коэффициента сопротивления от угла направления течения и вертикальной координаты. Далее формируется вектор сил и моментов, действующих на сооружение со стороны течения. Аналогично рассчитывалась и ветровая нагрузка на систему плавучих опор с пролетным строением.

Расчет напряжений в якорных связях производился квазистатическим методом, при этом натяжение и траектория линии являются функцией положения клюзовой точки сооружения. При расчете якорных связей учитывались их растяжение, возможность укладки части связи на дно акватории. Для расчета жесткостных характеристик якорных связей использовалось аналитическое решение уравнений свободно провисающей гибкой тяжелой и растяжимой связи. Разработанная методика позволяет вычислять вертикальные и горизонтальные компоненты натяжения связи при произвольном положении клюзовой точки [5, 8]. Далее в программном комплексе строятся жесткостные характеристики всех связей, и получается общая многомерная кусочно-линейная жесткостная характеристика всей системы удержания в виде

$$F_R(X_c, L_1) = \sum_{j=1}^N C_j \left(T_j \left(B_{jx}(X_c), B_{jz}(X_c) \right) \right), \quad (3)$$

где X_c – вектор перемещений сооружения в шести степенях свободы; $B_{jx}(X_c)$, $B_{jz}(X_c)$, – операторы, позволяющие на основании вектора X_c рассчитать вертикальные и горизонтальные координаты клюзовых точек произвольной j -й связи; T_j – оператор, рассчитывающий реакцию каждой связи по ее жесткостной характеристике и координатам клюзовой точки; $C_j(T_j)$ – оператор, преобразующий реакцию j -й связи в вектор реакции относительно центра тяжести сооружения; N – число связей.

Кроме жестких требований к обеспечению точности позиционирования объектов под воздействием

внешних условий система позиционирования должна отвечать критериям проектирования (таким как коэффициенты безопасности), заложенным в «Правилах разработки и проведения морских операций» и «Правилах классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ» Российского морского регистра судоходства [7, 8]. В качестве критериев оценки системы позиционирования приняты требования к коэффициентам безопасности по нагрузкам в якорных связях, приведенные в «Правилах классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ».

Коэффициенты безопасности представляют собой отношение разрывной нагрузки к максимальному усилию в наиболее нагруженной якорной связи. Минимально допустимое значение коэффициента безопасности по Правилам ПБУ/МСП при динамическом методе расчета равно 2,0, при квазистатическом расчете – 2,7.

Характеристики якорных связей системы позиционирования, полученные в результате расчетов, представлены в табл. 1.

В результате предварительных расчетов определены начальные натяжения связей, критерием которых было принято положение плавучих опор в отсутствие внешних нагрузок без горизонтальных смещений и углов рысканья. Начальные параметры связей приведены в табл. 2.

Для расчета реакции швартовых устройств рассчитывается текущее положение сооружений – векторы координат центров тяжести X_{c1} , X_{c2} . Жесткостные характеристики швартовых связей рассчитываются аналогично якорным.

Вектор реакции швартовых связей для i -го сооружения представляется в виде

$$F_{Si}(X_{c1}, X_{c2}) = \sum_{j=1}^{N_s} C_{isj} (T_j (b_{js}(X_{c1}, X_{c2}))), \quad (4)$$

где $b_{js}(X_{c1}, X_{c2})$ – оператор, преобразующий координаты центров тяжести объектов в расстояние между точками крепления j -й швартовой связи, связывающей объекты; $C_{isj}(T_j)$ – оператор, преобразующий

Таблица 1. Характеристики якорных связей

Table 1. Parameters of mooring lines

Наименование характеристики	Величина
Диаметр троса, мм	42
Разрывное усилие, кН	1262
Вес 1 м в воздухе, кН/м	0,072
Модуль упругости E , кН/мм ²	70

Таблица 2. Начальные параметры связей

Table 2. Initial parameters of structural members

Номер плавопоры	1				2			
	1	2	3	4	5	6	7	8
Номер якорной связи								
Длина связи (ориентировочно), м	74	74	248	212	212	248	74	74
Начальное натяжение, кН	94	424	269	295	295	269	94	424

натяжение j -й связи в вектор реакции относительно i -го сооружения; N_s – число швартовых связей.

Моделирование работы отбойных устройств содержит расчет и кусочно-линейную аппроксимацию жесткостной характеристики каждого отбойного устройства; определения зон контакта каждого отбойного устройства с корпусом плавсистемы; расчет деформаций отбойных устройств и сил реакции. В результате составлен оператор реакции всех отбойных устройств для i -го сооружения:

$$F_{Bi}(X_{c1}, X_{c2}) = \sum_{j=1}^{N_B} C_{iBj} (R_{Bj}(X_{c1}, X_{c2})), \quad (5)$$

где $R_{Bj}(X_{c1}, X_{c2})$ – реакция j -го отбойного устройства; $C_{iBj}(R_{Bj})$ – оператор преобразования реакции

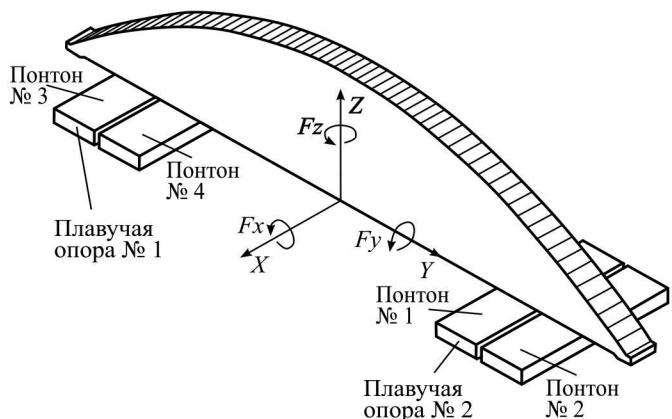


Рис. 2. Направление координатных осей: X – продольно-горизонтальное смещение центра объекта; Y – поперечно-горизонтальное смещение центра объекта; Z – вертикальное смещение центра объекта; F_x – угловое перемещение центра объекта относительно оси X (углы крена); F_y – угловое перемещение центра объекта относительно оси Y (углы дифферента); F_z – угловое перемещение центра объекта относительно оси Z (углы рысканья)

Fig. 2. Directions of coordinate axes: X – surging motions of the object’s center; Y – swaying motions of the object’s center; Z – heaving motions of the object’s center; F_x – rolling motions of the object’s center; F_y – pitching motions of the object’s center; F_z – yawing motions of the object’s center

j -го отбойного устройства в вектор реакции относительно i -го сооружения; N_B – число отбойных устройств [2–4, 6]. Направление координатных осей показано на рис. 2.

Требования и ограничения, предъявляемые к точности позиционирования при проведении морской операции

Requirements and limitations for positioning accuracy during marine operations

В качестве ограничений применялись требования к обеспечению необходимой точности позиционирования при предельных внешних воздействиях. Предельные параметры гидрометеоусловий в ходе выполнения технологических операций в «ковше» при передаче пролетных строений со стапеля на плавучие опоры составляли:

- скорость ветра – до 10 м/с;
- высота волны $h_{3\%}$ – до 0,5 м;
- скорость течения – до 0,3 м/с.

При выполнении технологических операций в районе створа моста предельные параметры гидрометеоусловий составляли:

- скорость ветра – до 10 м/с;
- высота волны $h_{3\%}$ – до 1,0 м;
- скорость течения – до 0,9 м/с.

Отличались и требования, предъявляемые к точности позиционирования в «ковше» и в створе моста. В условиях предельных внешних воздействий требуемая точность позиционирования в створе моста составляла около ± 30 см, в «ковше» требования к точности позиционирования при погрузке пролетных строений были еще более строгими [1].

Полученные в результате расчетов амплитуды горизонтальных колебаний при позиционировании в «ковше» каждой плавучей опоры, входящей в состав плавсистемы, превышали допустимый диапазон перемещений. Поэтому прошел следующий этап математического моделирования, в результате которого дополнительно были установлены электрические лебедки для увеличения точности позиционирования плавучих опор при заведении под пролетные арочные строения в «ковше». В результате расчетная величина амплитуды горизонтальных колебаний при позиционировании плавучей системы в створе моста под

действием экстремальных сил составила 30 см, а амплитуда вертикальной качки не превысила 5 см, что удовлетворяет требованиям; при этом угловые колебания практически отсутствовали.

Параметры системы позиционирования

Positioning system parameters

Оценка параметров системы позиционирования в «ковше» выполнена с помощью динамического метода при воздействии на каждую плавопору внешних нагрузок от ветра, течения и волнения для следующих курсовых углов воздействия (КУВ) внешних сил:

- с северо-востока (курсовой угол КУВ-0°);
- с севера (курсовой угол КУВ-45°);
- с северо-запада (курсовой угол КУВ-90°);
- с юго-востока (курсовой угол КУВ-270°);
- с востока (курсовой угол КУВ-315°).

Западное (КУВ-135°), юго-западное (КУВ-180°) и южное (КУВ-225°) направления соответствуют воздействию внешних сил со стороны берега, откуда развитие волнения и течения невозможно, поэтому в расчете для этих направлений был применен квазистатический метод при воздействии ветра.

Результаты расчетной оценки системы позиционирования каждой из плавопор выполнены в табличной форме для начальной стадии балластировки и аналогично в конечной стадии балластировки при транспортной осадке и при осадке заведения под пролетное строение. В табл. 3 приведены результаты расчетной оценки системы позиционирования плавопоры № 1 в начальной стадии балластировки (при транспортной осадке).

Результаты анализа полученных расчетных параметров позиционирования при отгрузке на плавучие опоры железнодорожного арочного пролетного строения (аналогичные расчеты выполнены и для автодорожного арочного пролетного строения) со сборочной площадки показали, что требования Правил ПБУ/МСП к коэффициентам безопасности якорных связей выполняются для всех рассмотренных схем и сочетаний параметров гидрометеоусловий.

Определены статические смещения плавопор, возникающие в результате совместного действия ветра и течения, которые могут компенсироваться за счет маневрирования связями и достигают:

- 0,41 м – в положении при балластировке;
- 0,35 м – в положении на оси погрузки пролетного строения.

Таблица 3. Результаты расчетной оценки системы позиционирования плавопоры № 1 в начальной стадии балластировки (при транспортной осадке) ($h_{3\%} = 0,5$ м; $v_b = 10$ м/с; $v_t = 0,3$ м/с)

Table 3. Analytical assessment results for positioning system of floating support No. 1 at the initial stage of ballasting (transit draft) ($h_{3\%} = 0,5$ m; $v_b = 10$ m/s; $v_t = 0,3$ m/s)

Параметры		Направление воздействия внешней нагрузки							
		С-В	С	С-З	Ю-В	В	З	Ю-З	Ю
		0°	45°	90°	270°	315°	135°	180°	225°
Метод расчета		Динамический					Квазистатический*		
Статические смещения центра объекта	$X_{ст}$, м	0,01	0,02	0,0	0,0	0,01	-0,02	-0,02	-0,02
	$Y_{ст}$, м	-0,10	0,14	0,16	-0,35	-0,32	0,11	0,07	-0,23
	$Z_{ст}$, м	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$Fx_{ст}$, град.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$Fy_{ст}$, град.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$Fz_{ст}$, град.	-0,18	0,05	0,10	-0,43	-0,42	0,04	0,10	-0,22
Амплитуды колебаний центра объекта	$X_{3\%}$, м	0,03	0,01	0,0	0,0	0,01	-	-	-
	$Y_{3\%}$, м	0,0	0,12	0,18	0,18	0,10	-	-	-
	$Z_{3\%}$, м	0,0	0,0	0,01	0,01	0,0	-	-	-
	$Fx_{3\%}$, град.	0,0	0,03	0,11	0,11	0,03	-	-	-
	$Fy_{3\%}$, град.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-
	$Fz_{3\%}$, град.	0,04	0,17	0,20	0,21	0,18	-	-	-
Суммарные смещения центра объекта	X , м	0,04	0,03	0,01	0,0	0,02	-	-	-
	Y , м	-0,10	0,26	0,35	-0,53	-0,43	-	-	-
	Z , м	0,0	0,0	-0,01	-0,01	0,0	-	-	-
	Fx , град.	0,0	-0,03	-0,12	-0,12	-0,03	-	-	-
	Fy , град.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-
	Fz , град.	-0,22	0,22	0,31	-0,65	-0,60	-	-	-
Максимальное усилие в якорных связях, кН		462	462	478	423	434	408	405	404
Коэффициент безопасности		2,73	2,73	2,64	2,98	2,91	3,09	3,12	3,12

Примечание: * – при воздействии только ветра

При воздействии волнения с высотой волны 3 %-ной обеспеченности 0,5 м с северо-запада или юго-востока наибольшая амплитуда горизонтальных колебаний плавопор составляет:

- 0,86 м – в положении при балластировке;
- 0,18 м – в положении на оси погрузки пролетного строения.

Максимальная амплитуда вертикальных колебаний плавопор при таком волнении равна:

- 0,04 м – в положении при балластировке;

- 0,01 м – в положении на оси погрузки пролетного строения.

Выполненные расчеты позволили предварительно определить наибольшую амплитуду горизонтальных колебаний плавопор в положении на оси погрузки пролетного строения при воздействии волнения с высотой волны 3 %-ной обеспеченности 0,5 м. Также удалось определить направление действия волновой нагрузки, при котором амплитуда горизонтальных колебаний плавопор дости-

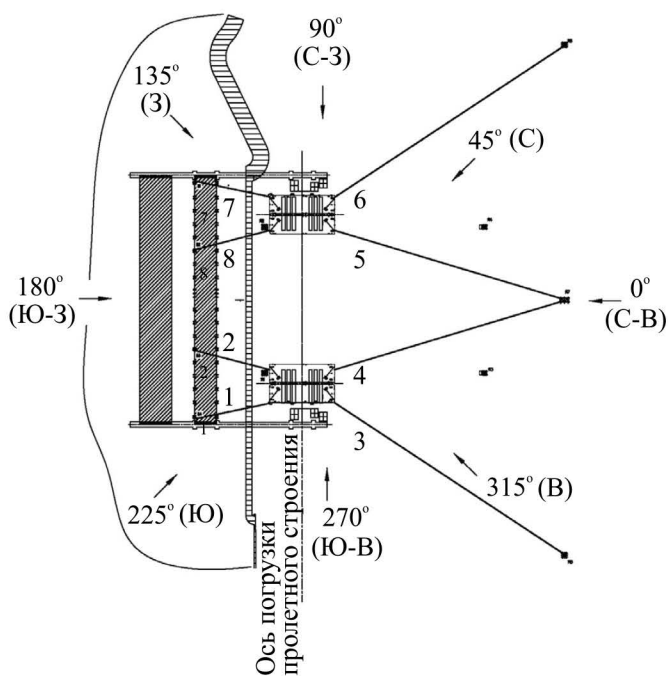


Рис. 3. Схема системы позиционирования плавопор при положении под арочным пролетным строением (на оси погрузки пролетного строения)

Fig. 3. Positioning system of floating supports under the bridge span (along its loading axis)

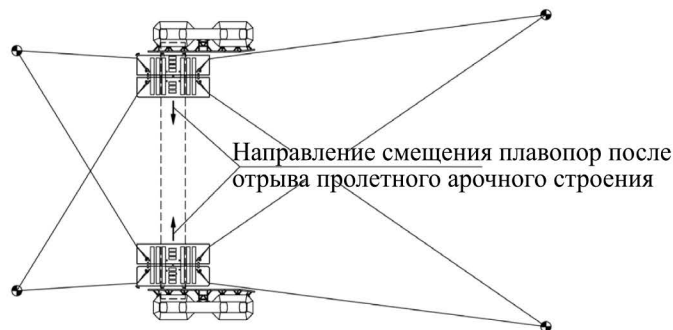


Рис. 4. Схема позиционирования в створе моста

Fig. 4. Layout of positioning in the bridge cross-section

гает наибольшего значения 0,18 м – направление с северо-запада или юго-востока. Вертикальные колебания в заданных условиях имели минимальное значение. В результате была разработана расчетная схема системы позиционирования (рис. 3) с учетом рассмотрения всех направлений воздействия внешних сил.

Аналогичное моделирование было выполнено и для положения плавсистемы при позиционировании в створе моста.

При моделировании процесса отрыва пролетного арочного строения от плавопор был выявлен эффект, возникающий из-за неравномерных углов

заложения якорных связей. Под действием натяжения якорных связей, расположенных по внутренним бортам плавучих опор, они начинали смещаться к центру судоходного канала (рис. 4). В процессе качки на волнении это приводило к смещению плавучих опор относительно точек опирания пролетного арочного строения.

В результате численного моделирования в программном комплексе Anchored Structures выполнена оценка влияния неравномерности углов заложения якорных связей на плавопоры после отрыва пролетного арочного строения, т.е. после снятия нагрузки с плавучих опор, и предложены меры по снижению натяжения в связях, расположенных по внутренним бортам каждой плавучей опоры, чтобы исключить их смещение к центральной части судоходного канала.

Заключение

Conclusion

Исходя из условий обеспечения необходимой точности к положению плавучей системы при выполнении всех технологических операций и безопасности на всех этапах морской операции были определены оптимальные параметры системы позиционирования. Расчеты позволили определить количество гидравлических якорных лебедок, жесткостные характеристики системы позиционирования, оптимизировать расположение свайных якорей.

На основе использованных методологий с помощью программного комплекса осуществлялось моделирование поведения морских плавучих объектов при строительстве моста через Керченский пролив. Результаты численного моделирования в программном комплексе Anchored Structures дали высокую сходимость результатов расчетов с реальными процессами. Выбранные параметры системы позиционирования позволили установить плавучую систему с пролетными арочными строениями с минимальным отклонением от теоретического положения. При позиционировании в «ковше» также была обеспечена необходимая точность, а погрузка пролетных строений выполнена на проектные точки опирания.

Анализ результатов подтверждает эффективность применения методов численного моделирования для прогнозирования и контроля поведения плавучих объектов при выполнении работ в реальных условиях и обеспечивает хорошую сходимость с реальными процессами, происходящими при проведении морских операций.

Библиографический список

1. *Большев А.С.* Математическое моделирование операций по установке пролетных строений Крымского моста / А.С. Большев, И.Л. Благовидова, А.В. Пьянов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 2. С. 182–198.
2. *Большев А.С., Фролов С.А., Кутейников М.А.* Математическое моделирование поведения морских плавучих объектов в программном комплексе «Anchored Structures» // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2013. № 36. С. 68–90.
3. *Garrison C.J., Chow P.Y.* Wave forces on submerged bodies // Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division. Vol. 98. No. WW3. P. 375-392.
4. *Фролов С.А.* Статика и динамика плавучих сооружений, закрепленных гибкими упругими связями: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбГТУ, 1992. 16 с.
5. *Меркин Д.Р.* Введение в динамику гибкой нити. М.:Наука, 1980.
6. *Большев А.С., Торопов Е.Е., Шхинек К.Н., Фролов С.А.* Математическое моделирование процесса накатки верхнего строения на опорное основание морской платформы Приразломного нефтяного месторождения // Гидротехническое строительство. 2007. № 5. С. 70–75.
7. Правила разработки и проведения морских операций. СПб.: РМРС, 2014.
8. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. СПб.: РМРС, 2014.

References

1. *A. Bolshev.* Mathematical modeling of the Crimean Bridge span installation. St. Petersburg State Polytechnical University: Journal of Engineering Science and Technology. 2018, Vol. 24, No. 2, pp. 182-198 (in Russian).
2. *A. Bolshev, S. Frolov, M. Kuteinikov.* Mathematical simulation of floating object behavior in Anchored Structures software package // RS Research Bulletin, 2013, No. 36, pp. 68-90 (in Russian).
3. *Garrison C.J., Chow P.Y.* Wave forces on submerged bodies // Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division. Vol. 98. No. WW3. P. 375-392.
4. *S. Frolov.* Statics and dynamics of floating structures with flexible elastic mooring lines. Autoabstract of Cand.Sc. Theses. St. Petersburg State Technical University, 1992, 16 pp. (in Russian).

5. *D. Merkin.* Introduction to flexible thread dynamics. Moscow, Nauka, 1980 (in Russian).
6. *A. Bolshev, Ye. Toropov, K. Shkhinek, S. Frolov.* Mathematical modeling of the rolling of offshore platform topsides onto its substructure at *Prirazlomnoye* oil field // *Power Technology and Engineering*, 2007, No. 5, pp. 70-75 (in Russian).
7. Russian Maritime Register of Shipping. Rules for Planning and Execution of Marine Operations. St. Petersburg, 2014.
8. Russian Maritime Register of Shipping. Rules for Classification, Construction and Equipment of Drilling Floating Units and Fixed Marine Platforms. St. Petersburg, 2014.

Сведения об авторах

Науменко Александр Александрович, инженер АО «ЦКБ Коралл». Адрес: 299028, Россия, Севастополь, ул. Репина, 1. Тел.: 8 978 061-13-56. E-mail: aleksandr-naumenko-1997@mail.ru.

Благовидова Ирина Львовна, зам. начальника отдела АО «ЦКБ Коралл». Адрес: 299028, Россия, Севастополь, ул. Репина, 1. Тел.: 8 978 736-15-50. E-mail: office@cdbcoral.ru.

Пьянов Андрей Владимирович, начальник сектора АО «ЦКБ Коралл». Адрес: 299028, Россия, Севастополь, ул. Репина, 1. Тел.: 8 978 766-98-92. E-mail: office@cdbcoral.ru.

Иванова Ольга Александровна, к.т.н., инженер-конструктор 1-й категории АО «ЦКБ Коралл». Адрес: 299028, Россия, Севастополь, ул. Репина, 1. Тел.: 8 978 744-31-63. E-mail: o.a.ivanova.kmt@mail.ru.

About the authors

Naumenko, Aleksandr A., Engineer, JSC “Central Design Office *Korall*”, address: 1, Repina st., Sevastopol, Russia, post code 299028, tel.: 8 978 061-13-56. E-mail: aleksandr-naumenko-1997@mail.ru.

Blagovidova, Irina L., Deputy Head of Department, JSC “Central Design Office *Korall*”, address: 1, Repina st., Sevastopol, Russia, post code 299028, tel. 8 978 736-15-50. E-mail: office@cdbcoral.ru.

Pyanov, Andrey V., Head of Sector, JSC “Central Design Office *Korall*”, address: 1, Repina st., Sevastopol, Russia, post code 299028, tel.: 8 978 766-98-92. E-mail: office@cdbcoral.ru.

Ivanova, Olga A., Cand. Sci. (Eng), 1st category Design Engineer, JSC “Central Design Office *Korall*”, address: 1, Repina st., Sevastopol, Russia, post code 299028, tel.: 8 978 744-31-63. E-mail: o.a.ivanova.kmt@mail.ru.

Поступила / Received: 27.06.19
Принята в печать / Accepted: 29.08.19
© Коллектив авторов, 2019