

DOI: 10.18721/JEST.240216
УДК 624.21, 627.034

А.С. Большев¹, И.Л. Благовидова², А.В. Пьянов²

1 – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

2 – АО «ЦКБ Коралл», г. Севастополь, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ ПО УСТАНОВКЕ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ КРЫМСКОГО МОСТА

В статье рассматриваются этапы проектирования и реализации морской операции, связанной с установкой пролетных строений Крымского моста. Описывается методология выполнения математического моделирования с помощью программного комплекса «Anchored Structures» и приведены примеры ранее реализованных проектов с использованием этого комплекса. Перечислены этапы, из которых состояла морская операция по установке пролетных строений Крымского моста. Описаны экстремальные внешние условия, необходимые для обеспечения безопасности выполнения операций. Перечислены ограничения, которые учитывались на стадии проектирования. Описан состав систем позиционирования, разработанных для выполнения различных этапов операции. Приведены параметры элементов систем позиционирования, полученные путем математического моделирования проектируемых операций. Описан ход реализации морских операций по установке пролетных строений Крымского моста и сделано заключение о совпадении расчетных параметров с данными, полученными в ходе натурных наблюдений за выполнением морских операций.

Ключевые слова: математическое моделирование, проектирование, морская операция, система позиционирования, пролетные строения моста, Крымский мост.

Ссылка при цитировании:

А.С. Большев, И.Л. Благовидова, А.В. Пьянов. Математическое моделирование операций по установке пролетных строений крымского моста // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 2. С. 182–198. DOI: 10.18721/JEST.240216.

A.S. Bolshev¹, I.L. Blagovidova², A.V. Pianov²

1 – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia,
St. Petersburg, Russia

2 – Central design bureau «Coral», Sevastopol, Russia

MATHEMATICAL MODELING OF THE INSTALLATION OF SPANS ON THE CRIMEAN BRIDGE

The article discusses the stages of design and implementation of marine operations connected with the installation of the spans on the Crimean Bridge. Mathematical modeling methodology using the Anchored Structures software is described. Examples of previously executed projects using this software are presented. The stages, which consisted of the marine operation to install the spans for the Crimean Bridge, are given. The extreme external natural conditions under which it is necessary to ensure the safety of marine operations are described. The limitations that were taken into account at the design stage are listed. The arrangement of the positioning systems developed to perform various stages of the operation is described. The parameters of the positioning system elements obtained by mathematical modeling of the designed marine operations are presented. The implementation of marine operations for installing spans on the Crimean Bridge is described and the conclusion about the coincidence of the estimated parameters with the data obtained during field observations on the execution of marine operations is presented.

Keywords: mathematical modeling, design, marine operations, positioning system, bridge span, Crimean Bridge

Citation:

A.S. Bolshev, I.L. Blagovidova, A.V. Pianov, Mathematical modeling of the installation of spans on the Crimean Bridge, *Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(02)(2018) 182–198, DOI: 10.18721/JEST.240216.



Введение

Вопросы морского и речного строительства всегда были в фокусе внимания научных школ Санкт-Петербургского политехнического университета. Значительные достижения в этой области были связаны с работами кораблестроительного отделения Политехнического института, которое образовалось в 1902 году и к 1917 году превратилось в первый в России кораблестроительный факультет, а в 30-х годах XX века – в самостоятельный институт. В дальнейшем морская тематика продолжала существовать на гидротехническом факультете ЛПИ. Здесь была образована кафедра «Водные пути и порты», которая стала центром по подготовке кадров для портового строительства в Северо-Западном регионе СССР.

В 70-х годах прошлого века по инициативе декана гидротехнического факультета профессор Г.В. Симакова была создана научная группа, активно включившаяся в решение вопросов морского строительства на континентальном шельфе. При реализации работ данной тематики научные сотрудники группы тесно взаимодействовали с коллегами из формировавшихся в

этот период научных школ академиков Ю.С. Васильева и М.П. Федорова.

На протяжении ряда последних десятилетий научные школы гидротехнического факультета (ныне инженерно-строительного института) СПбПУ принимали активное участие в проработке и научном обосновании множества крупных проектов, широко известных в России. Одним из таких проектов является создание Крымского моста.

Решение о строительстве моста через Керченский пролив было принято после возвращения Крыма в состав России в 2014 году. Крымский мост – самый протяженный мост России; его начало находится на Таманском полуострове, затем он проходит по Тузлинской косе и острову Тузла, пересекает фарватер и заканчивается в Керчи. Длина железнодорожного моста – 18118 м, автомобильного – 16857 м.

Мост представляет собой длинную эстакаду с пролётами от 54,2 до 64,2 м (рис. 1), а Керчь-Еникальский канал перекрывается арками (по одной на авто- и железнодорожном мостах) длиной 227 м и высотой 45 м с подмостовым судоходным габаритом высотой 35 м и шириной 185 м.



Рис. 1. Основные характеристики Крымского моста

Fig. 1. The main characteristics of the Crimean Bridge

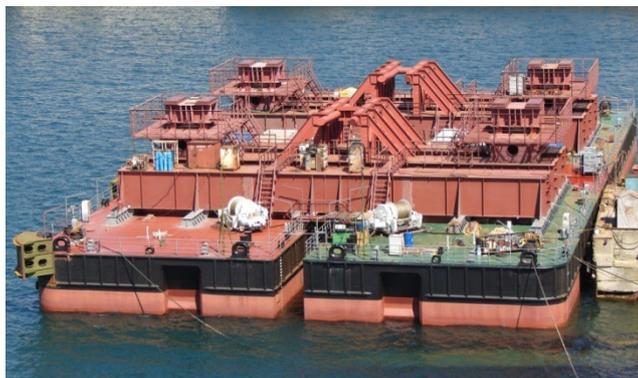


Рис. 2. Плавучая опора № 2
(фото пресс-службы Севастопольского морского завода)
Fig. 2. Floating support No 2

Самой крупной металлоконструкцией моста является судоходный пролёт арочно-го типа с высотой арки над ним 45 метров. Установка судоходного пролёта согласно проекту должна была выполняться с помощью понтонной плавучей системы, изготовленной на «Севморзаводе» в г. Севастополе. Плавучая система включала в себя две плавучие опоры длиной 60,2 м, шириной – 16,5 м, высотой борта – 5 м, соединенных между собой. Вид плавучей опоры в процессе постройки показан на рис. 2. На эти плавучие опоры надо было погрузить судоходный пролет с берегового стапеля, отбуксировать пролет к месту установки, а затем поднять и установить пролет на стационарные опоры Крымского моста.

В оснащение каждой плавучей опоры входили дизель-гидравлическая станция для питания всего электрического оборудования и системы балластных насосов для наполнения балластных отсеков, балластная система для изменения осадки опор и лебедки системы позиционирования.

Создание плавучих опор для погрузки на них пролетных арочных строений – самых тяжелых и габаритных элементов моста, а также проект морских операций по транспортировке плавучей системы (комплекс сооружений, состоящий из двух плавучих опор и установленного на них пролетного строения) к мостовым опорам в фарватере с последующим вводом в створ

моста – это и были те задачи, которые предстояло решить АО «ЦКБ «Коралл» в рамках настоящего проекта.

Одной из наиболее сложных и ответственных задач было обеспечение позиционирования плавучей системы в момент передачи массивного пролетного строения со стапеля на систему плавучих опор и при подъеме пролетного строения с плавучей системы на стационарные опоры Крымского моста. Ввиду податливости плавучих опор при воздействии ветра, течения и волнения система «плавучие опоры – пролетное строение» совершала колебания, которые могли стать причиной аварийной ситуации. Значительная масса этой системы, большие габаритные размеры определяют уникальность данной морской операции. Именно правильное определение параметров системы позиционирования, обеспечивающей выполнение технологических операций, связанных с перемещением плавучих опор по отдельности и плавучей системы в целом, имело огромное значение для успешного завершения важнейшего этапа строительства Крымского моста – установки пролетных арочных строений на мостовые опоры.

Таким образом, основной целью проектной проработки морской операции стало изучение поведения системы «плавучие опоры – пролетное строение» под действием внешних нагрузок и разработка системы позиционирования, обеспечивающей

безопасность выполнения всех этапов операции при экстремально-допустимом уровне внешних воздействий.

Методология решения задачи

Выбор параметров системы позиционирования и формирование ее состава базировались на математическом моделировании всех этапов морской операции с помощью специализированного программного комплекса «Anchored Structures» [1–4], разработанного в Санкт-Петербургском политехническом университете.

В проектной проработке морской операции по установке пролетных строений Крымского моста это программное средство было основным инструментом для анализа поведения комплекса объектов, участвующих в выполнении всех этапов операции, и формирования инженерных решений, направленных на обеспечение ее безопасности.

Программный комплекс предназначен для статического и динамического анализа свободно плавающих, заякоренных или стационарных морских сооружений.

Функциональные возможности программного комплекса позволяют производить расчеты – балластировки, устойчивости, систем заякорения и позиционирования, нагрузок от ветра, течения, волнения и льда; динамики сооружений; динамики плавучих объектов при морских операциях; динамики якорных и швартовных связей; а также выполнять спектральный и вероятностный анализ результатов и создавать трехмерную анимацию поведения сооружений в процессе моделирования.

Для определения внешних нагрузок на исследуемые объекты в программном комплексе создается или импортируется из других программных сред трехмерная модель сооружения.

При анализе поведения плавучих сооружений всегда предварительно оценивается его устойчивость, рассчитываются гидродинамические характеристики в различных степенях свободы и затем производится расчет волновых нагрузок от регу-

лярных волн и нерегулярного волнения. В общем случае волнение представляется одним из известных спектров волнения, который моделируется как совокупность элементарных гармоник с рассчитываемой амплитудой, частотой и случайной фазой.

Вектор волновой нагрузки на сооружение в 6-ти степенях свободы – $\mathbf{F}_w(t) = (F_{w1}, \dots, F_{w6})$, зависящий от времени, определяется в этом случае как суперпозиция нагрузок отдельных составляющих спектра:

$$\mathbf{F}_w(t) = \sum_{i=1}^N \mathbf{F}_{wi}(\omega_i) \sin(\omega_i t + \varphi_i), \quad (1)$$

где \mathbf{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 \mathbf{F}_{wi} и гидродинамических параметров сооружения (λ – матрица присоединенных масс; \mathbf{B} – матрица коэффициентов волнового сопротивления) для каждой конкретной частоты спектра волнения. Для получения значений этих параметров на различных частотах использовалась дифракционная теория и разновидность широко известного метода гидродинамических особенностей – метода пространственных источников излучения [5].

Ветровая нагрузка на систему плавучих опор с пролетным строением в программном комплексе рассчитывалась по формуле

$$F = \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 A_w(\alpha_w) C_w(\alpha_w), \quad (2)$$

где V_w – расчетная средняя скорость ветра, м/с; ρ_a – плотность воздуха; $A_w(\alpha_w)$ – функция площади парусности от угла направления ветра α_w ; $C_w(\alpha_w)$ – функция коэффициента сопротивления от угла направления ветра.

В силу приведенной зависимости формировался полный вектор постоянной составляющей ветровой нагрузки по 6-ти степеням свободы.

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 аналогичной формуле:

$$F_c = \frac{1}{2} \rho_w \int_z V_c^2 A_c(\alpha_c, z) C_c(\alpha_c, z) dz, \quad (3)$$

где $A_c(\alpha_c, z)$ и $C_c(\alpha_c, z)$ – функции от угла направления течения и вертикальной координаты соответственно эквивалентной площади сечения подводной части и коэффициента сопротивления. Далее формируется вектор сил и моментов, действующих на сооружение со стороны течения.

Моделирование натяжения в якорных связях производилось квазистатическим методом; при этом натяжение и траектория линии являются функцией положения ключевой точки сооружения. Для расчета жесткостных характеристик якорных связей использовалось аналитическое решение уравнений свободно провисающей гибкой тяжелой и растяжимой связи [6], которые являются точными по сравнению с широко известными уравнениями цепной линии [7]. Разработанная методика позволяет вычислять вертикальные и горизонтальные компоненты натяжения связи при произвольном положении ключевой точки. Далее в программном комплексе строятся жесткостные характеристики всех связей и получается общая многомерная кусочно-линейная жесткостная характеристика всей системы удержания в виде

$$F_R(X_c, L_1) = \sum_{j=1}^N C_j(T_j(B_{jx}(X_c), B_{jz}(X_c))), \quad (4)$$

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 ключевых точек произвольной j -й связи; T_j – оператор рассчитывающий реакцию каждой связи по ее жесткостной характеристике и координатам ключевой точки; $C_j(T_j)$ – оператор, преобразующий реакцию j -й связи в вектор реакции относительно центра тяжести сооружения; N – число связей.

Для определения 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

$$F_{Si}(X_{c1}, X_{c2}) = \sum_{j=1}^{N_s} C_{isj}(T_j(b_{js}(X_{c1}, X_{c2}))), \quad (5)$$

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

Моделирование работы отбойных устройств включает: расчет и кусочно-линейную аппроксимацию жесткостных характеристики каждого отбойного устройства; поиск возможных зон контакта каждого отбойного устройства с корпусом сооружения; расчет деформаций отбойных устройств и сил реакции. В результате составляется оператор реакции всех отбойных устройств для i -го сооружения:

$$F_{Bi}(X_{c1}, X_{c2}) = \sum_{j=1}^{N_B} C_{iBj}(R_{Bj}(X_{c1}, X_{c2})), \quad (6)$$

где $R_{Bj}(X_{c1}, X_{c2})$ – реакция j -го отбойного устройства; $C_{iBj}(R_{Bj})$ – оператор преобразования реакции j -го отбойного устройства в вектор реакции относительно i -го сооружения; N_B – число отбойных устройств.

Программный комплекс позволяет описывать геометрию балластных цистерн, задавать режимы их заполнения или опорожнения, учитывать изменение осадки и инерционные характеристики плавучего объекта с учетом текущего уровня заполнения балластных отсеков.

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.

Использованные методологии математического моделирования поведения морских плавающих объектов, реализованные в программном комплексе «Anchored Structures», который получил сертификат о типовом одобрении Российского морского регистра судоходства (1997 г., 2002 г., 2007 г., 2012 г., 2017 г.), ранее применялись в разнообразных успешно реализованных проектах.

В 2001 году с помощью указанного комплекса выполнена НИР «Разработка методики и программных средств для обеспечения расчетов динамики подъема и транспортировки АПК «Курск»». С помощью ПК «Anchored Structures» инженерами АО «ЦКБ МТ «Рубин»» выполнено моделирование следующего: баржи на начальном этапе подъема, когда АПК лежит на грунте; динамики АПК и баржи в момент отрыва АПК от дна; динамики АПК и баржи в процессе подъема АПК с помощью домкратов, оснащенных компенсаторами; динамики АПК и баржи непосредственно перед и после соединения АПК с баржей; динамики баржи и АПК в процессе транспортировки [8].

Примером использования рассматриваемой методологии может также служить математическое моделирование накатки верхнего строения платформы (ВСП) «Хаттон», созданной для освоения месторождения «Приразломное» [9], на опорное основание платформы, что затем было успешно осуществлено в сентябре 2006 года силами ПО «Севмашпредприятие» с участием российских и зарубежных исполнителей.

В этом же программном комплексе моделирование морских операций, связанных с погрузкой нефти, выполнялось авторским коллективом сотрудников АО «ЦКБ «Коралл»» и СПбПУ в 2005 году. В процессе реализации этой операции стационарный морской ледостойкий отгрузочный

причал (СМЛОП), отгрузочный шланг, танкер и удерживающий его буксир должны были находиться в непрерывном взаимодействии, динамические аспекты которого во многом определяли условия обеспечения допустимого уровня надежности. Для всестороннего анализа поведения системы «СМЛОП – танкер – буксир» в комплексе были сформированы около 400 расчетных ситуаций, различающихся дедевитом танкера, его осадкой, режимом нерегулярного волнения, направлением распространения волн, скоростью и направлением ветра и течения, толщиной льда, упором движительного комплекса и тягой буксира [10]. С помощью программного комплекса все расчетные ситуации были последовательно промоделированы и получено общее представление о поведении системы «СМЛОП – танкер – буксир»; в результате сформулированы задачи последующего физического эксперимента. Кроме того, на основании проведенного теоретического исследования получены результаты, позволяющие определить условия, при которых обеспечивается безопасность выполнения операций по перегрузке нефти со СМЛОП и определены оптимальные режимы взаимодействия танкера, вспомогательного судна и швартовой системы для максимального расширения погодных условий, при которых гарантируется безопасность отгрузки нефтепродуктов. В 2007 году спроектированный стационарный морской ледостойкий отгрузочный причал вошел в эксплуатацию и успешно функционирует до настоящего времени.

На платформе данного программного комплекса была также решена задача о динамике двустворчатого плавающего затвора с сегментными батопортами, входящего в состав судопропускного сооружения С-1 Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений. На основе математического моделирования в ПК «Anchored Structures» совместно с АО «ЦКБ МТ «Рубин»», АО «ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева» [11–13] был отработан алгоритм функционирования плавающего затвора, исследована и оптимизирована система мягкой посадки батопортов на порог. В настоящее время

плавучий затвор с сегментными батопортами успешно прошел испытания, введен в эксплуатацию и уже защитил Санкт-Петербург от нескольких наводнений.

Таким образом, на основе использованных методологий и с помощью единого программного комплекса осуществлялось моделирование поведения самых различных морских плавающих объектов на разных этапах их возведения или эксплуатации, в различных режимах функционирования, при тех или иных внешних воздействиях. На основании анализа широкого перечня моделируемых ситуаций обычно удается принять наиболее обоснованные проектные решения, оптимизирующие конструкцию плавающего объекта или системы его удержания и обеспечивающие приемлемый уровень безопасности морских сооружений.

Этапы моделирования морской операции по установке пролетных строений

Расчетный анализ, выполненный в программном комплексе «Anchored Structures», охватывал все этапы проведения морской операции. Условно их можно разделить на три основных этапа, которые, в свою очередь, можно также подразделить по характерным признакам.

1. Работы, выполняемые в операционной акватории «ковша» у стапеля:

а) балластировка плавающих опор, заведение и удержание их под пролетным арочным строением с помощью канатов системы позиционирования;

б) дебалластировка плавающих опор и прием веса пролетного арочного строения;

в) выведение плавучей системы на ось подходного канала и швартовка к свайным якорям на период формирования буксирного ордера.

2. Транспортировка плавучей системы из акватории «ковша» по подходному каналу и далее по Керченскому подходному и Керчь-Еникальскому каналам к месту монтажа арочных пролетных строений.

3. Позиционирование и монтаж пролетных строений в створе моста:

а) постановка плавучей системы на свайные якоря в створе моста;

б) позиционирование в створе моста;
в) подъем арочного пролетного строения.

Ограничения для обеспечения безопасности выполнения морской операции

В качестве ограничений выступали требования к обеспечению необходимой точности позиционирования при предельных внешних воздействиях. Параметры гидрометеоусловий выбирались на основании инженерно-метеорологических изысканий и их анализа с учетом преобладающих в это время года параметров ветра, волнения и течения, а также наличия погодных окон продолжительностью не менее 72 часов. Принятые предельные параметры гидрометеоусловий во время выполнения технологических операций в «ковше» при передаче пролетных строений со стапеля на плавающие опоры: скорость ветра – до 10 м/с; высота волны – $h_{3\%}$ – до 0,5 м; скорость течения – до 0,3 м/с.

Следует отметить, что при ухудшении погодных условий скорость ветра могла увеличиваться до 16–18 м/с в зависимости от времени проведения операции.

При выполнении технологических операций в районе створа моста приняты следующие предельные параметры гидрометеоусловий: скорость ветра – до 10 м/с; высота волны $h_{3\%}$ – до 1,0 м; скорость течения – до 0,9 м/с.

Отличались друг от друга и требования, предъявляемые к точности позиционирования в «ковше» и в створе моста. Так, например, в условиях предельных внешних воздействий требуемая точность позиционирования в «ковше» составляет всего лишь ± 5 см, а при позиционировании в створе моста ± 30 см.

Помимо требований к соблюдению точности позиционирования, система позиционирования должна отвечать критериям проектирования (таким, как коэффициенты безопасности), заложенным в «Правилах разработки и проведения морских операций» [14] и «Правилах классификации, постройки и оборудования плавающих буровых установок и морских стационарных платформ» [15] Российского морского регистра судоходства.

Математическое моделирование этапов морской операции

Каждому этапу морских операций предшествовало математическое моделирование, прорабатывались различные варианты внешних воздействий. Для выполнения позиционирования плавучих опор использовались специально установленные на них лебедки. Концы швартовных линий крепились к береговым свайным якорям, швартовным сваям и к свайным якорям. Схемы раскрепления приведены на рис. 3–5. Пространственные характеристики системы позиционирования, физико-механические характеристики тросов, их натяжения и параметры лебедок уточнялись по мере выполнения математического моделирования.

В программном комплексе «Anchored Structures» были созданы подробные модели, повторяющие характеристики как плавучих, так и стационарных сооружений. По отдельности были рассмотрены процессы выполнения технологических опера-

ций в «ковше» и в районе створа моста. На рис. 6–9 показаны геометрические модели объектов, использованные в процессе моделирования этапов морской операции.

Параметры системы позиционирования были определены исходя из условий обеспечения необходимой точности положения плавучей системы в целом при выполнении технологических операций и безопасности на всех этапах морской операции. Не были оставлены без внимания и вопросы, связанные с возникновением нестандартных ситуаций, таких, как попадание плавучей системы в неблагоприятные погодные условия и ее штормовой отстой. И, хотя теоретически такой сценарий развития событий должен исключаться путем получения надежного прогноза погоды из нескольких независимых и имеющих соответствующие лицензии и разрешения источников, в реальности погода в районе Керченского пролива крайне изменчива и нестабильна, а усиление ветра до штормовых значений возможно в любой момент.

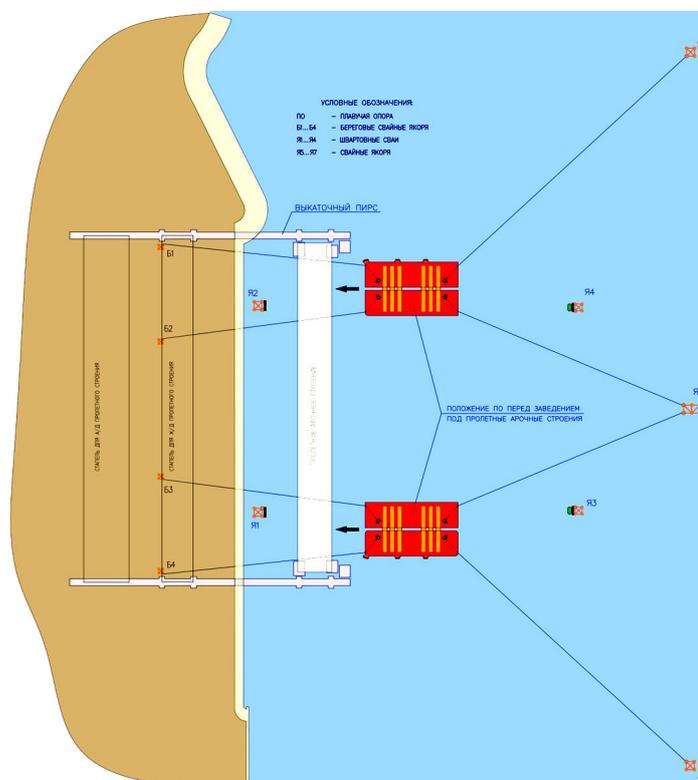


Рис. 3. Схема для балластирования и заведения плавучих опор
 Fig. 3. Scheme of the floating support balasting

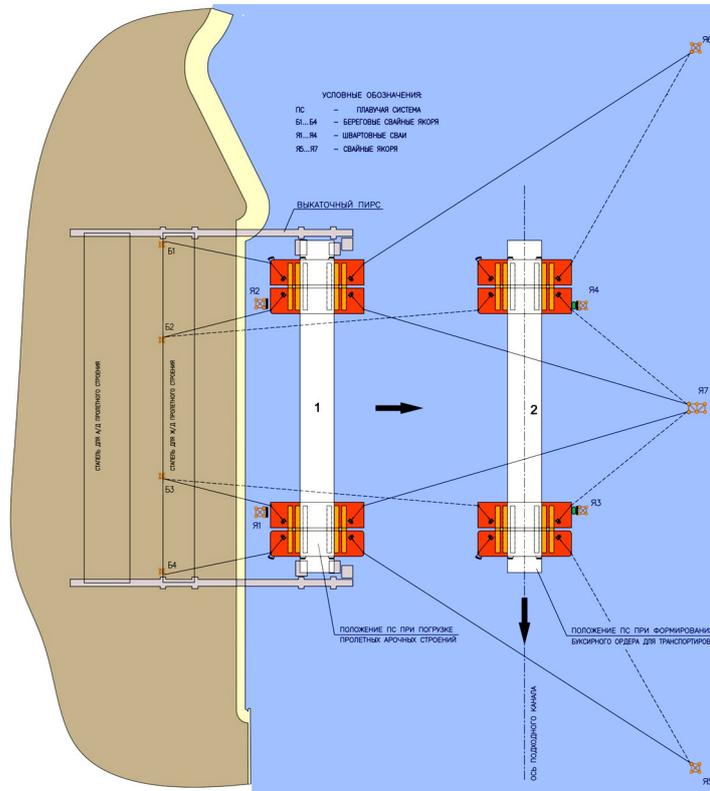


Рис. 4. Схема приема веса пролетного строения и вывод плавучей системы на ось подходного канала для формирования буксирного ордера
 Fig. 4. The scheme of give weight on the spanbridge and output of floating system on an axis of the channel for the tow order formation

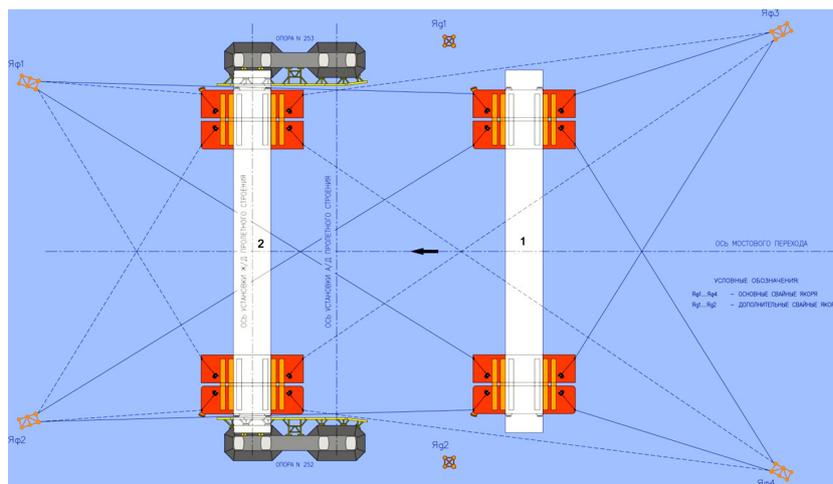


Рис. 5. Схема постановки на якоря и позиционирования плавучей системы в створе Крымского моста
 Fig. 5. The scheme of anchoring and positioning of the floating system near the Crimean Bridge

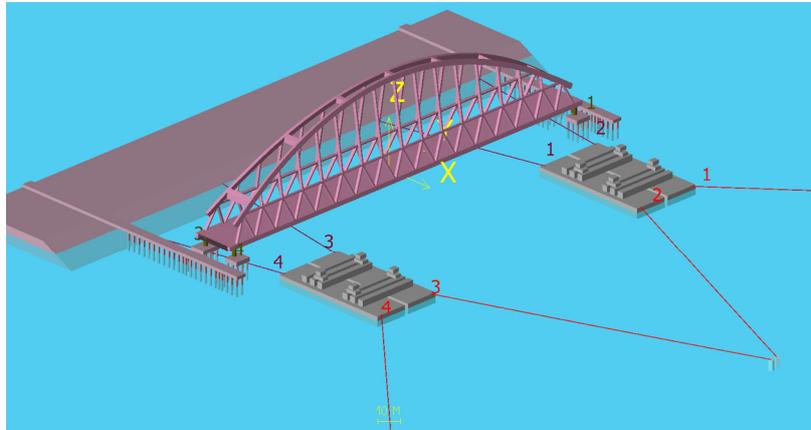


Рис. 6. Забалластированные плавучие опоры перед заведением под пролетное арочное строение

Fig. 6. Floating supports with ballast before installation under the span of the arched structure

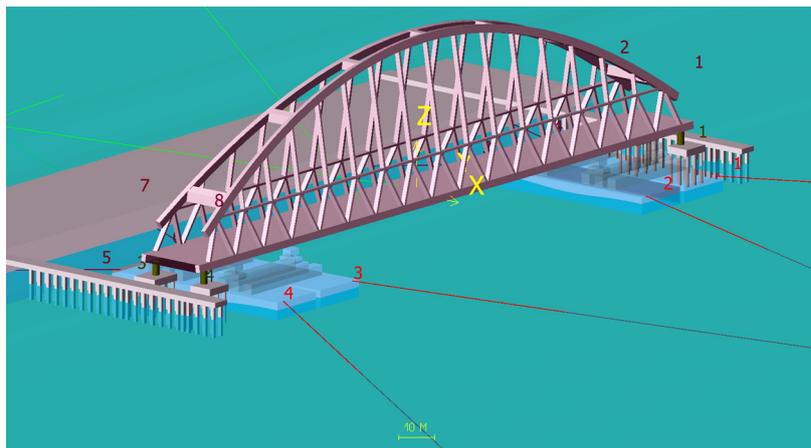


Рис. 7. Позиционирование забалластированных плавучих опор под пролетным арочным строением с учетом воздействия ветра, течения и волнения со стороны открытой акватории

Fig. 7. Position of the floating support with ballast under the arched structure span taking into account the effects of wind, currents and waves

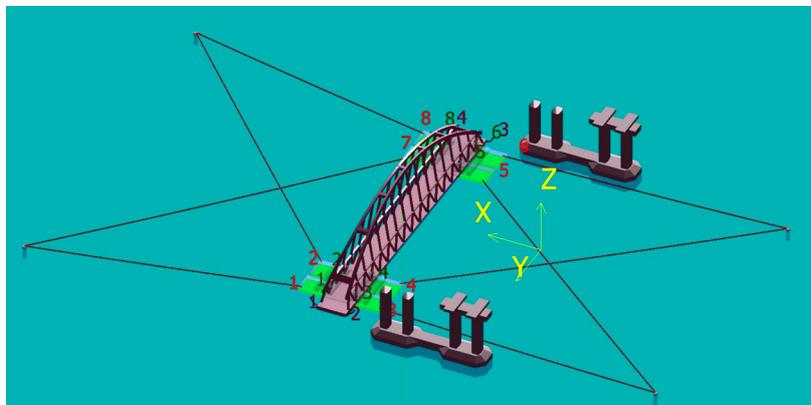


Рис. 8. Позиционирование плавучей системы перед входом в створ моста

Fig. 8. Position of the floating system before entering in the bridge area

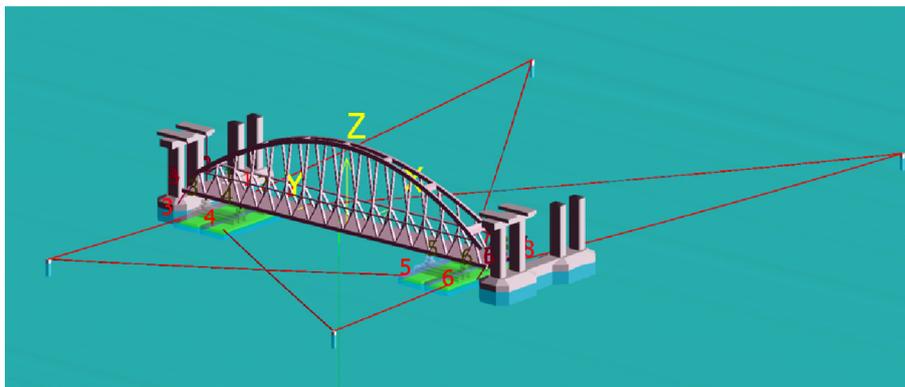


Рис. 9. Positionирование плавучей системы в створе моста и удержание в процессе подъема пролетного арочного строения

Fig. 9. Position of the floating system in the bridge area and holding the system during the span bridge lifting

На основании предварительного расчетного анализа был произведен выбор параметров лебедок системы позиционирования, которые впоследствии были установлены на плавучие опоры.

Выполненные расчеты позволили определить такие характеристики системы позиционирования, как необходимое тяговое усилие, диаметр и разрывную нагрузку тросов, диапазон их рабочего натяжения, а также произвести оптимизацию точек расположения свайных якорей. На основании расчетов в состав системы позиционирования плавучего объекта вошли восемь гидравлических якорных лебедок с максимальным тяговым усилием 650 кН, способных обеспечить ввод и удержание плавучей системы в створе моста при воздействии предельных гидрометеороусловий в наихудшем сочетании. Лебедки были оснащены стальными канатами диаметром 43 мм с разрывным усилием 1314 кН, а оптимальное натяжение составило около 300 кН.

В дальнейшем полученные расчетные амплитуды горизонтальных колебаний отдельных плавучих опор при позиционировании в «ковше» под действием экстремальных нагрузок (при использовании штатных лебедок системы позиционирования) составили 8 см, что оказалось вы-

ше требуемых значений. За этим последовала разработка дополнительных мероприятий и рекомендаций по увеличению точности позиционирования плавучих опор в «ковше» при заведении под пролетные арочные строения с помощью дополнительных временно устанавливаемых электрических лебедок. Впоследствии при выполнении реальных операций по погрузке пролетных арочных строений дополнительные лебедки были задействованы как при погрузке железнодорожной, так и автомобильной пролетных арочных строений. При позиционировании плавучей системы в створе моста расчетная величина амплитуды горизонтальных колебаний под действием экстремальных сил составила 30 см, что соответствовало требованиям.

Амплитуда вертикальной качки в обоих случаях не превышала 5 см, а угловые колебания практически отсутствовали.

Помимо выбора лебедок позиционирования, с помощью программного комплекса «Anchored Structures» были решены вопросы обеспечения плавучих опор кранцевой защитой. В результате расчетов получены максимальные реакции, возникающие в элементах кранцевой защиты; они легли в основу расчетов местной



прочности корпуса и непосредственно выбора кранцевых устройств.

Моделирование поведения порожних плавучих опор в створе моста после отрыва пролетного арочного строения в программном комплексе «Anchored Structures» позволило оценить эффект неравномерности углов заложения якорных связей, который приводил к тому, что после снятия нагрузки порожние плавучие опоры под действием связей, расположенных по внутренним бортам, резко смещались к центральной части Керченского пролива. Выполненные расчетные оценки позволили сделать рекомендации по снижению натяжения в связях, расположенных по внутренним бортам плавучих опор, в процессе подъема пролетных арочных строений.

Реализация морской операции

Работы, выполняемые в операционной акватории около стапеля (балластировка плавучих опор, заведение и удержание их под пролетным арочным строением), требовали наиболее высокой точности позиционирования и занимали значительное время. Операции по балластировке и заведению плавучих опор под железнодорожное пролетное арочное строение стартовали 26 августа 2017 года и продолжались в течение всего дня, а под автодо-

рожное пролетное строение – начались в условиях тихой погоды в ночь с 8 на 9 октября 2017 года и продлились в течение дня 9 октября.

Дебалластировка плавучих опор и прием веса пролетного железнодорожного арочного строения произошел 27 августа 2017 года, автодорожного – 10 октября 2017 г.

Выведение плавучей системы с железнодорожным пролетным строением на ось подходного канала было осуществлено 27 августа, с автодорожным пролетным строением – 10 октября. Процесс выведения занимал около двух часов. Сложность этой операции заключалась в небольших зазорах между кранцевой защитой, установленной на плавучих опорах, и выкаточным пирсом, что в свою очередь потребовало обеспечения высокой точности позиционирования для беспрепятственного выхода плавучей системы. На рис. 10, 11 показаны некоторые стадии этого этапа морской операции.

Транспортировка плавучей системы с железнодорожным пролетным строением началась в 22:00 27 августа 2017 г., а плавучей системы с автодорожным пролетным строением в 6:00 11 октября 2017 г.

Позиционирование и монтаж пролетных строений в створе моста показаны на рис. 12–14 для операции с установкой автодорожного пролетного строения.



Рис. 10. Пролетное арочное строение на выкаточном пирсе перед началом погрузки на плавучие опоры 26 августа 2017 г. (фото АО «ЦКБ «Коралл»»)

Fig. 10. The span of the arched structure onto the pier before loading on the floating support 26 Aug 2017 (photo by JSC «Central design bureau «Coral»»)



Рис. 11. Плавающая система на оси подходного канала 27 августа 2017 г.
(фото АО «ЦКБ «Коралл»»)

Fig. 11. Floating system on the approach channel axis on August 27, 2017
(photo by JSC «Central design bureau «Coral»»)



Рис. 12. Позиционирование и заведение плавающей системы
с автодорожным пролетным арочным строением в створ моста
с помощью системы позиционирования
(11 октября 2017 г., фото АО «ЦКБ «Коралл»»)

Fig. 12. Positioning and movement of a floating system
a road span arched structure in the bridge area
(October 11, 2017. Photo by JSC «CDB «Coral»»)

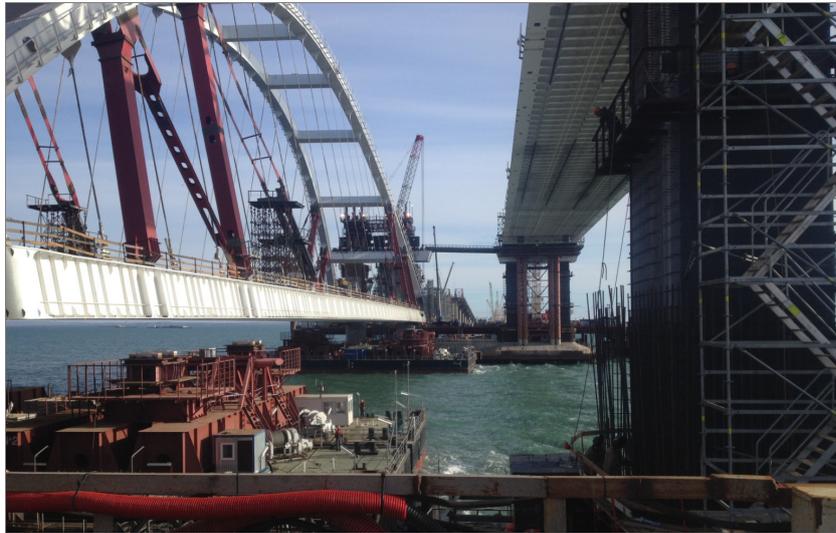


Рис. 13. Отрыв автодорожного пролетного арочного строения от плавучих опор (12 октября 2017 г., фото АО «ЦКБ «Коралл»»)

Fig. 13. Start of the lifting of the road the arched astucture span (12 October, 2017. Photo by JSC «CDB «Coral»»)



Рис. 14. Размах качки при установке автодорожного пролетного строения (менее 5 см). Высота волнения около 0,3 м (9 октября 2017 г., фото АО «ЦКБ «Коралл»»)

Fig. 14. The peak value of the pitching during installing the road span bridge (less than 5 sm). Wave height about 0,3 m (9 October, 2017. Photo by JSC «CDB «Coral»»)

В ходе выполнения реальных операций в створе моста выбранные с помощью программного комплекса «Anchored Structures» параметры канатов и лебедок позволили

добиться при позиционировании большей точности, чем это требовалось, и установить плавучую систему с пролетными арочными строениями с отклонением ме-

нее 10 см от теоретического положения. При позиционировании в «ковше» была обеспечена необходимая точность ± 5 см, а погрузка пролетных строений выполнена на проектные точки опирания.

Заключение

На всех этапах строительства и производства морских операций специалистами АО «ЦКБ «Коралл» осуществлялся авторский надзор и контроль за поведением плавучих опор и плавучей системы в процессе позиционирования: их мнение позволяет сделать заключение о том, что выполненный в программном комплексе «Anchored Structures» расчетный анализ показал очень хорошую сходимость с реальными процессами, происходящими при проведении морских операций. На всем протяжении выполнения

морских операций погодные условия не выходили за пределы допустимых, что, безусловно, благоприятствовало успешному завершению установки пролетных строений.

Благодаря подробному моделированию морских операций, в процессе их реального проведения складывалось ощущение их полной контролируемости и предсказуемости, что не могло не быть положительным фактором при осуществлении столь важного и ответственного этапа строительства Крымского моста.

Опыт, полученный в ходе проектирования и реализации уникальной операции по установке пролетных строений Крымского моста с податливых плавучих опор, безусловно, станет основой для выполнения новых уникальных проектов в области морского строительства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Большев А.С., Фролов С.А., Михаленко Е.Б.** Математическое моделирование поведения морских плавучих сооружений // Труды СПбГПУ. № 502. СПб., 2007. С. 252–274.
2. **Чиковская И. [и др.]**. Автоматизация деятельности организаций, обеспечивающих проектирование, строительство и эксплуатацию терминалов, портов, морских и речных гидротехнических сооружений // САПР и графика. Апрель 2014. С. 32–34
3. **Фролов С.А. [и др.]**. Математическое моделирование поведения морских объектов в среде ПК «Anchored Structures» // САПР и графика. Июнь 2015. С. 39–43.
4. **Фролов С.А. [и др.]**. Математическое моделирование поведения морских сооружений в среде «Anchored Structures». Практические рекомендации [Электронный ресурс] // <URL: <http://elibr.sptstu/dl/2s17-162.pdf>> / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Санкт-Петербург, 2017. 139 с.
5. **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, American Society of Civil Engineers, New York, USA.1
6. **Фролов С.А.** Статика и динамика плавучих сооружений, закрепленных гибкими упругими связями: Реферат дис. ... канд. техн. наук / СПб, СПбГТУ, 1992. 16 с.
7. **Меркин Д.Р.** Введение в динамику гибкой нити. М.: Наука, 1980. 240 с.
8. **Баранов И.Л. [и др.]**. «Математическое моделирование динамики подъема и транспортировки АПК «Курск» // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2002. № 1. С. 107–119.
9. **Торопов Е.Е. [и др.]**. Математическое моделирование процесса накатки верхнего строения на опорное основание морской платформы Приразломного нефтяного месторождения // Гидротехническое строительство. 2007. № 5. С. 70–75.
10. **Благовидова И.Л. [и др.]**. Математическое моделирование и программное исследование работы системы «Морской отгрузочный причал – Танкер – Буксир» // Сборник трудов конференции «Освоение арктического шельфа России». 2007.
11. **Климович В.И. [и др.]**. Исследование и доработка плавучего затвора судопропускного сооружения С-1 Комплекса защиты Санкт-Петербурга от наводнений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2012. Т. 266. С. 109–131.
12. **Чернецов В.А. [и др.]**. Система мягкой посадки плавучего затвора судопропускного сооружения С-1 комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений, Инженерно-строительный журнал № 9, 2012. С. 103–112



13. **Большев А.С. [и др.]**. Исследование гидродинамических воздействий и доработка системы мягкой посадки батопортов плавучего затвора С-1 комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2013. Т. 268. С. 85–110.

14. Правила разработки и проведения морских операций / РМРС. СПб., 2014. 144 с.

15. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ / РМРС. СПб., 2014. 483 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БОЛЬШЕВ Александр Станиславович — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: bolshev_as@spbstu.ru

БЛАГОВИДОВА Ирина Львовна — заместитель начальника отдела общего проектирования АО «ЦКБ Коралл»

E-mail: blagovidova@yandex.ru

ПЬЯНОВ Андрей Владимирович — начальник сектора динамики корабля АО «ЦКБ "Коралл"»

E-mail: a.pyanov@yahoo.com

Дата поступления статьи в редакцию: 01.06.2018

REFERENCES

[1] **Bolshev A.S., Frolov S.A., Mikhalenko Ye.B.**, Matematicheskoye modelirovaniye povedeniya morskikh plavuchikh sooruzheniy [Mathematical modeling of the marine floating structures behavior], *Trudy SPbGPU*. 2007. № 502. S. 252–274. (rus.)

[2] **Chikovskaya I.N. [и др.]**, Avtomatizatsiya deyatel'nosti organizatsiy, obespechivayushchikh proyektirovaniye, stroitel'stvo i ekspluatatsiyu terminalov, portov, morskikh i rechnykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [Automation of activities of the organizations providing design, construction and operation of terminals, ports, sea and river hydraulic structures], *SAPR i grafika*. April 2014. S. 32–34. (rus.)

[3] **Frolov S.A. [и др.]**, Matematicheskoye modelirovaniye povedeniya morskikh obyektov v srede PK «Anchored Structures» [Mathematical modeling of the of marine objects behavior in the program "Anchored Structures"], *SAPR i grafika*. Iyun 2015. S. 39–43. (rus.)

[4] **Frolov S.A. [и др.]**, Matematicheskoye modelirovaniye povedeniya morskikh sooruzheniy v srede «Anchored Structures». Prakticheskiye rekomendatsii [Mathematical modeling of the marine structures behavior in the «Anchored Structures» program. Practical guidelines. Textbook.] [Elektronnyy resurs]. <URL: <http://elib.spbstu/dl/2s17-162.pdf>> / Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskii universitet Petra Velikogo. St. Peterburg, 2017. 139 s. (rus.)

[5] **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, *American Society of Civil Engineers*. New York, USA.1.

[6] **Frolov S.A.**, Statika i dinamika plavuchikh sooruzheniy, zakreplennykh gibkimi uprugimi svyazyami [Statics and dynamics of floating structures fixed by flexible elastic lines]: Referat dis. ... kandidata tekhnicheskikh nauk / SPbGTU. SPb., 1992. 16 s. (rus.)

[7] **Merkin D.R.**, Vvedeniye v dinamiku gibkoy niti [Introduction to the dynamics of flexible thread]. M.: Nauka, 1980. 240 s. (rus.)

[8] **Baranov I.L. [и др.]**, Matematicheskoye modelirovaniye dinamiki podyema i transportirovki APK «Kursk» [Mathematical modeling of the lifting and transporting the dynamics of the submarine «Kursk»], *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2002. № 1. S. 107–119. (rus.)

[9] **Toropov Ye.Ye. [и др.]**, Matematicheskoye modelirovaniye protsessa nakatki verkhnego stroyeniya na opomoye osnovaniye morskoy platformy Prirazlomnogo neftyanogo mestorozhdeniya. [Mathematical modeling of the rolling process of the upper structure on the base of the sea platform Prirazlomnoye oil field], *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo*. 2007. № 5. S. 70–75. (rus.)

[10] **Blagovidova I.L. [и др.]**, Matematicheskoye modelirovaniye i programmnoye issledovaniye raboty sistemy «Morskoy otguzochnyy prichal — Tanker — Buksir» [Mathematical modeling and software research of the system «Sea shipping pier —

Tanker-Tug»], *Sbornik trudov konferentsii "Osvoyeniye arkticheskogo shelfa Rossii"*, 2007. (rus.)

[11] **Klimovich V.I. [i dr.]**, Issledovaniye i dorabotka plavuchego zatvora sudopropuskного sooruzheniya S-1 Kompleksa zashchity Sankt-Peterburga ot navodneniy, [Study and revision of floating gate of ship-crossing construction S-1 Complex of protection of St. Petersburg from floods], *Izvestiya VNIIG im. B.Ye. Vedeneyeva*. 2012. T. 266. S. 109–131. (rus.)

[12] **Chernetsov V.A. [i dr.]**, Sistema myagkoy posadki plavuchego zatvora sudopropuskного sooruzheniya S-1 kompleksa zashchitnykh sooruzheniy Sankt-Peterburga ot navodneniy [Soft landing system of floating gate of ship-crossing construction C-1 complex of St. Petersburg

protective structures from floods], *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal*. 2012. № 9. S. 103–112. (rus.)

[13] **Bol'shev A.S. [i dr.]**, Issledovanie gidrodinamicheskikh vozdeystviy i dorabotka sistemy myagkoy posadki batoportov plavuchego zatvora C-1 kompleksa zashchitnykh sooruzheniy Sankt-Peterburga ot navodneniy, *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneyeva*. 2013. T. 268. S. 85–110. (rus.)

[14] Pravila razrabotki i provedeniya morskikh operatsiy [Rules for planning and execution of marine operations] / RMRS. SPb., 2014. 144 s. (rus.)

[15] Pravila klassifikatsii, postroyki i oborudovaniya plavuchikh burovykh ustanovok i morskikh stacionarnykh platform [Rules of classification, construction and equipment of floating and fixed offshore platforms] / RMRS. SPb., 2014. 483 s. (rus.)

THE AUTHORS

BOLSHEV Aleksandr S. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: bolshev_as@spbstu.ru

BLAGOVIDOVA Irina L. – *Central design bureau «Coral»*

E-mail: blagovidova@yandex.ru

PIANOV Andreii V. – *Central design bureau «Corall»*

E-mail: a.pyanov@yahoo.com

Received: 01.06.2018