

УДК 681.518.5:627.332

*БУТОВ ВЛАДИМИР ГРИГОРЬЕВИЧ, докт. физ.-мат. наук, профессор,
зав. отделом,*

bvg@niipmm.tsu.ru

*СОЛОНЕНКО ВИКТОР АЛЕКСАНДРОВИЧ, канд. физ.-мат. наук,
зав. лабораторией,*

vik@niipmm.tsu.ru

*ЯЩУК АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ, канд. физ.-мат. наук,
ст. научный сотрудник,*

rainbow@niipmm.tsu.ru

*БОВСУНОВСКИЙ АЛЕКСАНДР БОРИСОВИЧ, канд. физ.-мат. наук,
ст. научный сотрудник,*

alexander.bovsunovsky@niipmm.tsu.ru

КУЛЕШОВ АРТЕМ АЛЕКСАНДРОВИЧ, аспирант,

artem.kuleshov@niipmm.tsu.ru

НИИ прикладной математики и механики ТГУ,

634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, корп. 10

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ПРИЧАЛЬНОГО СООРУЖЕНИЯ СВАЙНОГО ТИПА

В настоящей работе рассмотрен вопрос геометрического и конечно-элементного моделирования конструкции балкерного причала свайного типа с учетом взаимодействия свай с грунтовым основанием. Целью работы является определение напряженно-деформированного состояния конструкции причала под воздействиями внешних сил в условиях эксплуатации, а также, в случае необходимости, поиск вариантов усиления конструкции. Выполненные численные расчеты легли в основу выбора оптимальных мест установки деформационных датчиков и датчиков позиционирования на конструкции причала с учетом доступности их установки. На основе полученной конечно-элементной модели и организованной системы сбора информации с установленных датчиков создана система мониторинга, определяющая и визуализирующая в удобном для восприятия виде напряженно-деформированное состояние всей конструкции причала, запас прочности, а также тип внешнего воздействия в режиме реального времени.

Ключевые слова: морской балкерный причал; конечно-элементная модель; свая; грунт; система мониторинга; датчики; ANSYS.

VLADIMIR G. BUTOV, DSc, Professor,

bvg@niipmm.tsu.ru

VIKTOR A. SOLONENKO, PhD, Head of Laboratory,

vik@niipmm.tsu.ru

ALEKSEI A. YASHCHUK, PhD, Senior Research Assistant,

rainbow@niipmm.tsu.ru

ALEKSANDR B. BOVSUNOVSKII, PhD, Senior Research Assistant,

alexander.bovsunovsky@niipmm.tsu.ru

ARTEM A. KULESHOV, Research Assistant,

artem.kuleshov@niipmm.tsu.ru

Tomsk State University,
36, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia

MONITORING SYSTEM FOR PILED BERTHING FACILITIES

This paper presents the finite element modeling of berthing facilities with emphasis on the pile-soil interaction. The aim of this paper is to determine stress-strain state of berthing facility under operating and external loads, and to explore ways of the structure reinforcement if necessary. Numerical calculations provide the selection of optimal installation site for strain gauges on berthing facility.

The finite element model and the system of data collection from strain gauges allow constructing the system of monitoring that makes possible to detect and visualize the stress-strain state of the whole berthing facility and the safety factor together with the type of the external load in real-time situation.

Keywords: marine terminal; finite element model; monitoring software system; pile; soil; monitoring system; sensor; ANSYS.

История развития грузового надводного транспорта сопровождается увеличением не только количества кораблей, но и их размеров, а также грузоподъемности. Такие тенденции повышают спрос на портовые мощности, увеличение их числа и требования к надежности. Отсюда возрастает необходимость исследования в области решения вопросов безопасности эксплуатации гидротехнических сооружений (ГТС). На сегодняшний день исследования ведутся в нескольких направлениях: исследования механического поведения ГТС при швартовке судна, исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) свайного фундамента, поиск путей увеличения общей жесткости конструкции, их сейсмостойкости и т. д. [1–9]. Все эти исследования тем или иным образом направлены на предупреждение возникновения возможных чрезвычайных происшествий на ГТС.

В данной статье рассматривается вопрос комплексной разработки системы мониторинга причала, включающей создание конечно-элементной модели (КЭМ) причала для расчета его НДС, определения оптимального набора датчиков для установки их на причал, а также разработки программного обеспечения системы мониторинга причала, основная цель которой – визуализация НДС причала в режиме реального времени.

Рассматриваемый причал Ванинского балкерного терминала (рис. 1) относится к причалам свайного типа и состоит из семи основных секций (рис. 2), опирающихся на 122 сваи, и подходной эстакады, имеет общую длину 350 м и рассчитан на обслуживание судов водоизмещением до 204 тыс. т.

Верхнее строение причала представляет собой железобетонную платформу толщиной 0,6 м, опирающуюся на систему ригелей из заполненных бетоном труб сечением 1420×20 мм (рис. 2). Сваи проходят через насыпную призму высотой 7–9 м, несколько слоев донного грунта толщиной до 6 м и опираются на скальное основание (рис. 3).

Варианты различных способов конечно-элементного представления конструкции причала, а также различные способы описания взаимодействия системы «свая – грунт – ростверк» приведены в работе [10], где обоснована

и доказана наиболее адекватная расчетная схема свайного фундамента с грунтом в виде оболочечной модели представления причальной конструкции и жесткого представления грунта путём задания соответствующих граничных условий на стенках свай.



Рис. 1. Общий вид причала

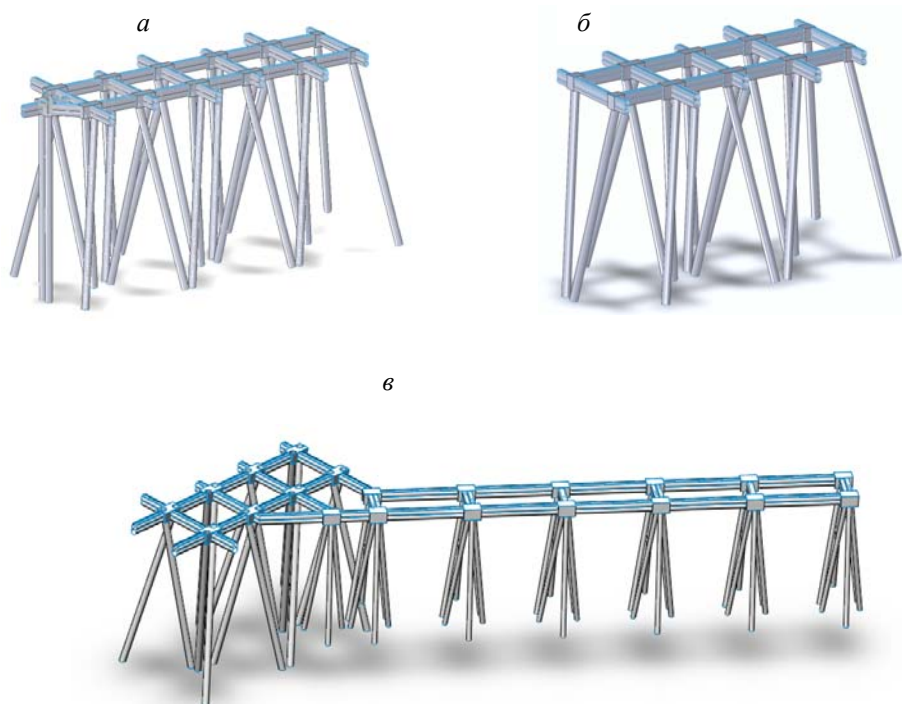


Рис. 2. Секции причала:
a – концевая; *b* – средняя; *v* – эстакада

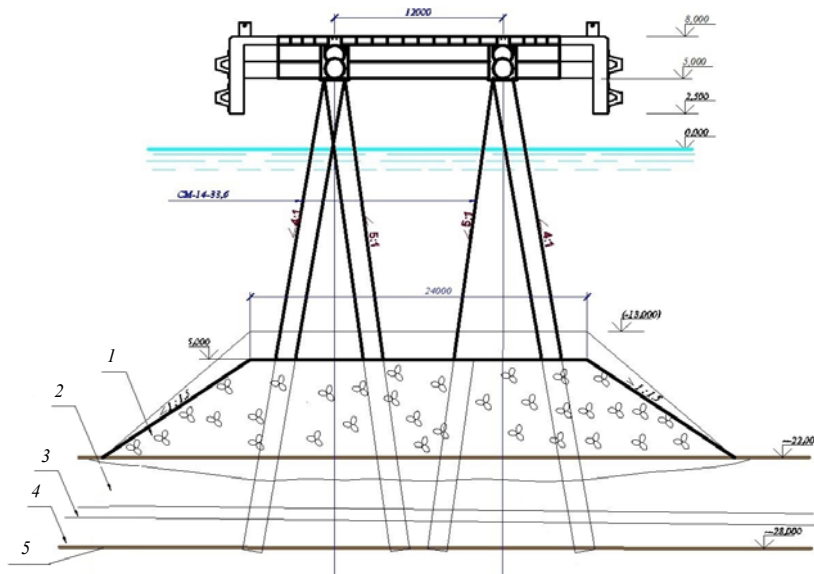


Рис. 3. Схема расположения свай в грунте:

1 – насыпь из валунного грунта; 2 – песок пылеватый; 3 – гравийный грунт с галькой; 4 – щебенистый грунт с дресвой; 5 – скальное основание

Конечно-элементная модель

В качестве системы определяющих уравнений выбираются законы сохранения количества движения и уравнения связей смещений, деформаций и механических напряжений [11–12] в виде

$$\int_V \rho \vec{F} dV + \int_S [\sigma] \vec{n} dS = 0, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} = \begin{cases} \frac{E}{2(1+\nu)} \varepsilon_{ij} & \text{для } i \neq j \\ \frac{E}{(1+\nu)} \left(\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{(1-2\nu)} \sum_{k=1,2,3} \varepsilon_{kk} \right) & \text{для } i = j, \end{cases} \quad (3)$$

где ρ – плотность материала в элементарном объеме; \vec{F} – результирующий вектор массовых сил; $[\sigma] \vec{n}$ – вектор внешних поверхностных сил, выраженный через тензор напряжений и единичный вектор нормали к элементарной площадке на поверхности тела; ε_{ij} – компоненты тензора деформации; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; ν – коэффициент Пуассона для материала; E – модуль упругости материала.

В качестве граничных и начальных условий задаются известные распределения смещений на закрепленных поверхностях, распределение внешних сил на свободных поверхностях, а также смещения в начальный момент времени в виде

$$\bar{u} = \bar{u}^{(S_1)}(t, \bar{x}) \quad \text{для } \bar{x} \in S_1, \quad (4)$$

$$[\sigma] \bar{n} = \bar{F}^{(S_2)}(t, \bar{x}) \quad \text{для } \bar{x} \in S_2, \quad (5)$$

$$\bar{u} = \bar{u}^{(V)}(t=0, \bar{x}) \quad \text{для } \bar{x} \in V. \quad (6)$$

Задача в постановке (1) – (3) с условиями (4) – (6) решается методом конечных элементов, который получается на основе применения метода Бубнова – Галеркина: объем тела разбивается на элементы, в узловых точках которых задаются известные функции формы так, что искомая функция перемещений в окрестности узла может быть выражена через значение перемещения в этом узле:

$$\bar{u}(\bar{x}) = \bar{u}_k \psi_k(\bar{x}). \quad (7)$$

В этом случае функция $\psi_k(\bar{x})$ может рассматриваться как базисная функция для окрестности узла с индексом k . Таким образом, после подстановки (7) в (1) и интегрирования получаем систему уравнений относительно узловых смещений в классическом для метода конечных элементов виде в статической постановке:

$$[K]\{U\} = \{B\}, \quad (8)$$

где $\{U\}$ – вектор искомых значений в узловых точках; $[K]$ – матрица, называемая матрицей жесткости; $\{B\}$ – вектор известных правых частей.

Искомые перемещения (а затем деформации и механические напряжения) могут быть получены после обращения матрицы $[K]$ в виде

$$\{U\} = [K]^{-1} \{B\}. \quad (9)$$

Построение КЭМ, задание свойств материалов, постановка граничных условий, а также решение полученной системы уравнений осуществлялось при помощи программного комплекса конечно-элементного моделирования ANSYS [11]. Внешний вид полученной КЭМ показан на рис. 4.

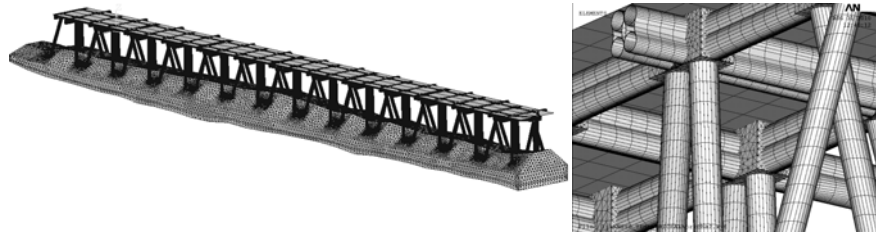


Рис. 4. Конечно-элементное представление элементов конструкции причала (сваи, ригели, блоки соединения ригелей)

Система датчиков, установленных на конструкции

Кроме непосредственно самой модели (физической и математической), в состав системы мониторинга входит аппаратура измерения и передачи данных, включающая 4 датчика смещений типа GPS (по два на носу и в средней части причала) и 16 датчиков деформаций на основе оптического волокна (типа MuST), расположенных на поверхности свай на 3 м ниже уровня моря (рис. 5), а также линии передачи данных и обработки сигналов.

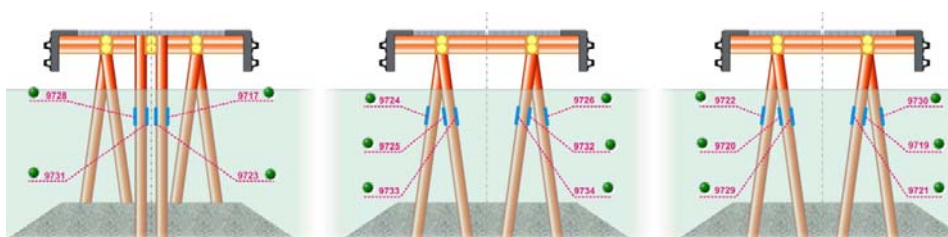


Рис. 5. Схема установки датчиков MuST

Датчики GPS выдают информацию 1 раз в 20 мин с точностью 2–5 мм, датчики MuST – 25 раз в секунду с точностью 2–5 мкм/м.

Данная система датчиков позволяет получать фиксированную информацию о деформированном состоянии, возникающем как под воздействием долговременных нагрузок вследствие сезонного температурного перепада (информация, полученная от датчиков GPS), так и кратковременных эксплуатационных нагрузок, таких как подход/отход судов, перемещение погрузочных машин по пирсу и т. д. (информация, полученная преимущественно от датчиков MuST).

Комплексная система мониторинга

Основной недостаток системы датчиков и вывода информации с них заключается в том, что отсутствует полная картина распределения НДС по всему причалу, т. к. количество датчиков ограничено.

В то же время, рассматривая структуру уравнений (8) и (9), можно сказать, что если объект находится под действием набора независимых механических нагрузок и ведет себя линейным образом, то его результирующее состояние может быть получено простой линейной комбинацией вклада каждой из нагрузок, т. е.:

$$\{U\} = \sum_n \{U_n\} = \sum_n [K]^{-1} \{B_n\}. \quad (10)$$

В большинстве случаев для объекта мониторинга возможно выделить конечный набор независимых типовых нагрузок, возникающих в штатном режиме эксплуатации. На основе конечно-элементной модели было проведено моделирование отклика конструкции на эти нагрузки, рассчитаны соответ-

ствующие варианты напряженно-деформированного состояния: деформации, напряжения, смещения. Для каждого из этих вариантов были определены ожидаемые деформации в местах размещения датчиков на реальной конструкции.

Исходя из предположения, что деформации конструкции в штатном режиме эксплуатации могут быть вызваны только известными типовыми нагрузками, а также из предположения линейного характера поведения материалов, любое НДС конструкции может быть выражено как линейная комбинация НДС типовых нагрузок

$$b = \sum a_i x_i \quad (11)$$

или в матричном виде

$$A \cdot x = b, \quad (12)$$

где A – матрица, столбцы которой составляют показания «модельных» датчиков по каждой из типовых нагрузок; x – вектор искомых коэффициентов комбинирования типовых нагрузок; b – вектор показаний реальных датчиков деформации.

Для однозначного определения коэффициентов необходимо, чтобы число типовых нагрузок, вызывающих линейно-независимые варианты нагружения датчиков, совпадало с числом датчиков. Однако для повышения точности и устойчивости решения обратной задачи целесообразно рассматривать переопределенную систему, в которой количество датчиков превышает количество рассматриваемых типовых нагрузок.

При этом коэффициенты будут определяться из условия минимизации невязки:

$$(b - Ax)^T W (b - Ax) \rightarrow \min, \quad (13)$$

где W – матрица весовых коэффициентов (в простейшем случае – единичная матрица). В случае отказа или сбоя в работе какого-либо датчика соответствующий диагональный элемент можно принять равным нулю.

Данным способом возможно решение обратной задачи деформирования такой сложной конструкции, как причал, с большим числом конечных элементов в доли секунды, поскольку в поиске решения участвуют не все точки расчетных вариантов НДС, а только точки, соответствующие местам установки датчиков измерительной системы.

Созданное в результате программное обеспечение системы мониторинга позволяет решать следующие задачи:

- сбор, анализ и отображение показаний датчиков смещений и деформаций в виде таблицы и графиков, определение коэффициента запаса прочности в режиме реального времени;
- расчет и отображение текущих смещений и эквивалентных механических напряжений в элементах конструкции причала в режиме реального времени;
- работа с архивными данными и перерасчет параметров для выбранного момента времени;

– статистическая обработка и анализ показаний датчиков с автоматическим выявлением особенностей поведения причала.

Работа системы мониторинга (рис. 6, а) основана на следующем алгоритме: на основе СНиП 2.06.04–82* и регулярных наблюдений за эксплуатацией причала выбраны возможные варианты его нагружения; с использованием созданной КЭ модели причала получено распределение смещений и напряжений по всей конструкции пирса для выбранных «стандартных» случаев. Кроме того, с использованием КЭ модели причала получено соответствие между значениями деформаций в местах установки датчиков и внешней нагрузкой. По данным датчиков смещений и деформаций определяется текущий вид и сила воздействия. По уже имеющейся зависимости распределения напряжений от внешнего воздействия картина деформаций по всей конструкции пирса восстанавливается и приводится в удобном для восприятия пользователем виде в системе визуализации FEMTerminal (рис. 6, б). Также рассчитывается обобщенный коэффициент запаса прочности причала. При превышении допустимых значений нагрузок пользователю выдается предупреждение. Текущие данные сохраняются в базе данных для последующего анализа.



Рис. 6. Схема системы мониторинга (а); вид пользовательского интерфейса (б)

Анализ данных датчиков позволяет выделить два типа поведения причала: кратковременное (типичный пример – швартовка судна, временной интервал – минуты) и долговременное (временной интервал – год). Оба вида поведения причала сравнивались с расчетными данными, полученными на КЭ модели. При анализе швартовки судна (рис. 7, а) определялись изменения деформаций, вызванные швартовкой (высоты пиков над текущим значением), и сравнивались с расчетными величинами. Так как величина усилия, действовавшего на причал, неизвестна, то расчетные значения нормировались по максимальной высоте пика. Среднее отклонение расчетных от экспериментальных данных составило 10 %, максимальное – 30 %.

При анализе долговременного поведения причала выяснилось, что основная причина – температурные деформации конструкции в связи с годовым циклом изменения температуры воды и воздуха. На рис. 7, б показано сравнение экспериментальных данных (черная кривая) с расчетными (серая кривая). Большой разброс расчетных значений вызван тем, что они были получены исходя из текущей температуры воздуха, имеющей значительные перепады в течение дня, в то время как реальная конструкция причала обладает большой тепловой инерционностью.

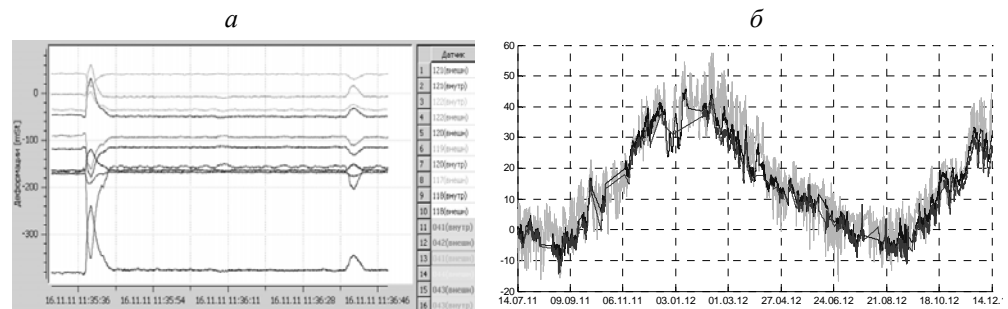


Рис. 7. Показания датчиков деформаций при швартовке судна, мкм/м (а); смещения носовой секции вдоль оси пирса, мм (б)

Исходя из результатов проделанной работы, на основании корреляции результатов численных расчетов и инструментальных измерений можно сделать заключение, что разработанное программное обеспечение системы мониторинга позволяет отслеживать и визуализировать объективную оценку технического состояния несущей конструкции причала. Такой подход позволяет проводить оценку различных эксплуатационных режимов в режиме реального времени с полной визуализацией НДС конструкции, а также вести статистическую обработку информации за время эксплуатации причала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Корчагин, Е.А. Опыт проектирования, строительства и эксплуатации причала в сложных условиях / Е.А. Корчагин // Речной транспорт (XXI век). – 2000. – № 1. – С. 63–64.
2. Корчагин, Е.А. Использование местных условий при строительстве портовых сооружений на слабых грунтах / Е.А. Корчагин // Материалы научно-практической конференции МГАВТ. – М.: Альтаир, 2010. – С. 26–28.
3. Костюков, В.Д. К вопросу о повышении несущей способности территории причалов на слабых основаниях / В.Д. Костюков, Г.А. Степанян // Речной транспорт (XXI век). – 2012. – № 1. – С. 70–72.
4. Gaythwaite, J. Design of marine facilities for the berthing, mooring, and repair of vessels / J. Gaythwaite. – ASCE Publications, 2004. – P. 525.
5. Dezi, F. Dynamic response of a near-shore pile to lateral impact load / F. Dezi, F. Gara, D. Roia // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2012. – № 40. – P. 34–47.
6. Wu, G. Dynamic elastic analysis of pile foundations using finite element method in the frequency domain / G. Wu, W.D.L. Finn // Canadian Geotechnical Journal. – 1997. – V. 34. – № 1. – P. 34–43.

7. *Matsumoto, T.* Comparison of Static and Dynamic Pile Load Tests at Thi Vai International port in Viet Nam / *T. Matsumoto, H.H. Nguyen* // *International Journal of Geoengineering Case histories*. – V. 3. – № 1. – P. 36–66
8. *Марченко, А.С.* Морские портовые сооружения на слабых грунтах / *А.С. Марченко*. – М. : Транспорт, 1976. – 312 с.
9. *Ермаков, В.А.* Методика МКЭ-оценки несущей способности конструкций с учетом наличия дефектов / *В.А. Ермаков, А.В. Коргин* // *Вестник МГСУ*. – 2009. – Спецвып. № 1. – С. 26–28.
10. *Система мониторинга причальной конструкции* / *А.А. Ящук, А.Б. Бовсуновский, В.Г. Бутов, А.А. Кулешов, В.А. Солоненко* // *Известия вузов. Физика*. – 2013. – Т. 56. – С. 137–139.
11. *Зенкевич, О.* Метод конечных элементов в технике: пер. с англ. / *О.Зенкевич*; под ред. *Б.Е. Победри*. – М. : МИР, 1975.
12. *ANSYS. ANSYS user's manual revision 12.1* [ANSYS. Версия 12.1 инструкции для пользователей пакета ANSYS]. ANSYS Inc.; 2009.

REFERENCES

1. *Korchagin E.A.* Opyt proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii prichala v slozhnykh usloviyakh [Experience of design, building and operation of berth in difficult conditions]. *Rechnoi transport (XXI vek)*. 2000. No. 1. Pp. 63–64. (rus)
2. *Korchagin E.A.* Ispol'zovanie mestnykh uslovii pri stroitel'stve portovykh sooruzhenii na slabykh gruntakh [Construction of port facilities on soft ground under local conditions]. *Proc. Sci. Conf. MGAVT. Al'tair Publ.*, 2010. Pp. 26–28. (rus)
3. *Kostyukov V.D., Stepanyan G.A.* K voprosu o povyshenii nesushchei sposobnosti territorii prichalov na slabykh osnovaniyakh [Increase of carrying capacity of berth territory on weak bases]. *Rechnoi transport (XXI vek)*. 2012. No. 1. Pp. 70–72. (rus)
4. *Gaythwaite J.* Design of marine facilities for the berthing, mooring, and repair of vessels. ASCE Publ., 2004. P. 525.
5. *Dezi F., Gara F., Roia D.* Dynamic response of a near-shore pile to lateral impact load. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2012. No. 40. Pp. 34–47.
6. *Wu G., Finn W. D. L.* Dynamic elastic analysis of pile foundations using finite element method in the frequency domain. *Canadian Geotechnical Journal*. 1997. V. 34. No. 1. Pp. 34–43.
7. *Matsumoto T., Nguyen H.H.* Comparison of Static and Dynamic Pile Load Tests at Thi Vai International port in Viet Nam. *Int. J. Geoengineering Case Histories*. V. 3. No. 1. Pp. 36–66.
8. *Marchenko A.S.* Morskie portovye sooruzheniya na slabykh gruntakh [Sea port facilities on soft ground]. Moscow : Transport Publ., 1976. 312 p. (rus)
9. *Ermakov V.A., Korgin A.B.* Metodika MKE-otsenki nesushchei sposobnosti konstruktсий s uchedom nalichiya defektov [FEM estimations of structural bearing capacity accounting for defects]. *Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture*, 2009. No. 1. Pp. 26–28. (rus)
10. *Yashchuk, A.A., Bovsunovskii A.B., Butov V.G., Kuleshov A.A., Solonenko V.A.* Sistema monitoringa prichal'noi konstruktсий [Monitoring system for berth construction]. *Russian Physics Journal*, 2013. V. 56. Pp. 137–139. (rus)
11. *Zienkiewicz O.C.* The finite element method in engineering science. McGraw-Hill London, 1971.
12. *ANSYS. ANSYS user's manual revision 12.1*. ANSYS Inc., 2009.