

Оригинальная статья

УДК 627.8

DOI: 10.26897/1997-6011-2023-2-92-98



## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВОЙ ПЕРЕМЫЧКИ СУХОГО ДОКА С УЧЕТОМ ЕЕ ПЕРЕПРОФИЛИРОВАНИЯ

**Рубин Олег Дмитриевич**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, директор филиала

SPIN-код: 2720-6627, AuthorID: 423001; o.rubin@hydroproject.ru

**Антонов Антон Сергеевич**<sup>1,2✉</sup>, канд. техн. наук, главный инженер, доцент НИУ МГСУ

SPIN-код: 7374-6867, AuthorID: 238171; ORCID: 0000-0002-8310-9604; SCOPUS: 57197566337; ResearcherID: AAC-7597-2022; antonov.an.s@yandex.ru

**Баклыков Игорь Вячеславович**<sup>1</sup>, главный специалист филиала

SPIN-код: 7987-9045, AuthorID: 915462; i.baklykov@hydroproject.ru

**Юрченко Александр Николаевич**<sup>2✉</sup>, канд. техн. наук, доцент

AuthorID: 487651; YurchenkoAN@mgsu.ru

<sup>1</sup>Филиал АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект» им. С.Я. Жука – НИИ энергетических сооружений», (АО «Институт Гидропроект»-«НИИЭС»); 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, 2, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Россия

**Аннотация.** Для строительства основания гравитационного типа в непосредственной близости от залива используется сухой док, который представляет собой котлован больших размеров в плане. Внутренний объем сухого дока, который используется для эксплуатации, формируют шпунтовые стенки и временная грунтовая перемычка. Потребовалось расчетное обоснование временной грунтовой перемычки. Целью работы являлось определение напряженно-деформированного состояния, проверка несущей способности конструкций грунтовой перемычки (шпунтовых ограждений, анкерных стержней) и общей устойчивости грунтовых призм системы «Сооружение-ограждающий грунтовой массив» с учетом ее перепрофилирования. Выполнены расчеты конструкции шпунтовой ограждающей стены котлована под фундамент контрфорса с уточнением достаточности принятых в чертежах решений по длине и расстоянию между анкерными стержнями и отметками низа шпунтовых стен по сечению, а также раскосов в западном примыкании и необходимости установки геотехнических анкеров. Расчеты выполнены в программном комплексе PLAXIS. В конечно-элементной модели реализованы: условия контактного взаимодействия сред; нелинейные и пластичные свойства материалов; геометрическая нелинейность в виде поэтапности возведения и последовательности приложения нагрузок.

**Ключевые слова:** сухой док, грунтовая перемычка, шпунтовая ограждающая стенка, анкерная тяга, конечно-элементная модель, напряженно-деформированное состояние, устойчивость откоса, фильтрация

**Формат цитирования:** Рубин О.Д., Антонов А.С., Баклыков И.В., Юрченко А.Н. Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния и устойчивости грунтовой перемычки сухого дока с учетом ее перепрофилирования // Природообустройство. 2023. № 2. С. 92-98. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-2-92-98.

© Рубин О.Д., Антонов А.С., Баклыков И.В., Юрченко А.Н., 2023

Original article

## RESULTS OF CALCULATIONS OF THE STRESS-STRAIN STATE AND STABILITY OF THE GROUND COFFERDAM OF THE DRY DOCK, TAKING INTO ACCOUNT ITS RE-PROFILING

**Rubin Oleg Dmitrievich**<sup>1</sup>, doctor of technical sciences, director of the branch of JSC «Institute «Hydroproject»-«NIIES»

SPIN-код: 2720-6627, AuthorID: 423001; o.rubin@hydroproject.ru

**Antonov Anton Sergeevich**<sup>1,2</sup>, candidate of technical sciences, chief engineer for equipment and HTS of the branch of JSC «Institute «Hydroproject»-«NIIES»  
SPIN-код: 7374-6867, AuthorID: 238171; ORCID: 0000-0002-8310-9604; SCOPUS: 57197566337; ResearcherID: AAC-7597-2022; antonov.an.s@yandex.ru

**Baklykov Igor Vyacheslavovich**<sup>2</sup>, chief specialist of the branch of JSC «Institute «Hydroproject»-«NIIES»  
SPIN-код: 7987-9045, AuthorID: 915462; i.baklykov@hydroproject.ru

**Yurchenko Alexander Nikolaevich**<sup>2</sup>✉, candidate of technical sciences, associate professor of the department GIGS NRU MGSU  
AuthorID: 487651; YurchenkoAN@mgsu.ru

<sup>1</sup> Branch of JSC «Design, Survey and Research Institute «Hydroproject» named after S.Ya. Zhuk – Research Institute of Energy Structures», (JSC «Institute Hydroproject»-«NIIES»), 125080, Moscow, Volokolamskoe sh., 2, Russia

<sup>2</sup> Moscow State University of Civil Engineering (MGSU), 129337, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, Russia

**Annotation.** The purpose of the work was to determine the stress-strain state, to check the bearing capacity of structures (sheet pile walls, anchor rods) and the overall stability of soil prisms of the «structure-enclosing soil mass» system, taking into account its re-profiling. According to the scope of work, computational study of the sheet pile wall structure of the excavation under the buttress foundation was performed (specifying the adequacy of the solutions adopted in the drawings for the length and spacing of the tie rods and the bottom marks of the sheet pile walls by section, as well as the struts in the west abutment and the need for geotechnical anchors. The computational studies were carried out with the PLAXIS software package. In the finite-element model there were realized: conditions of contact interaction of media; nonlinear and plastic properties of materials; geometrical nonlinearity in the form of staggered erection and sequence of loadings application.

**Keywords:** sheet piling, tie rods, finite element model, combination of loads, stress-strain state, slope stability, filtration

**Format of citation:** Rubin O.D., Antonov A.S., Yurchenko A.N., Baklykov I.V. Results of calculations of the stress-strain state and stability of the ground cofferdam of the dry dock, taking into account its re-profiling // Prirodoobustrojstvo. 2023. No. 2. S. 92-98. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-1-92-98.

**Введение.** Сухой док предназначен для строительства основания гравитационного типа. Сухой док представляет собой котлован больших размеров в плане, расположенный в непосредственной близости от залива. Внутренний, эксплуатационный объем сухого дока образуют шпунтовые стенки и временная грунтовая перемычка. План сооружений представлен на рисунке 1.

**Цель исследований:** расчеты по определению напряженно-деформированного состояния, проверке несущей способности конструкций

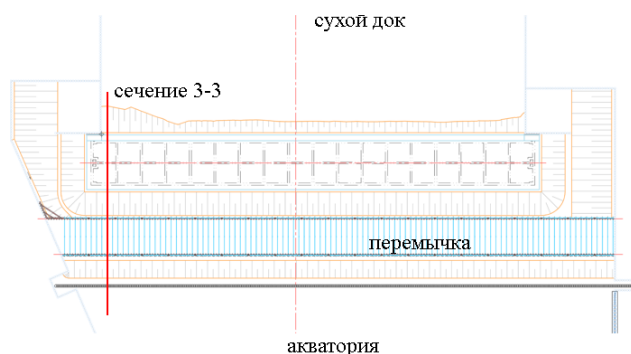


Рис. 1. План перемычки сухого дока

Fig. 1. Dry dock jumper plan

грунтовой перемычки (шпунтовых ограждений, анкерных тяг), а также общей устойчивости грунтовых призм системы «Сооружение-ограждающий грунтовый массив» с учетом ее перефигурирования.

Расчеты выполнены для конструкции шпунтовой ограждающей стенки котлована под фундамент батопорта, уточнения достаточности принятых в чертежах решений по длине и шагу анкерных тяг, отметок низа шпунтовых стен по сечению, а также распорных конструкций в западном примыкании и необходимости установки геотехнических анкеров.

Отметка гребня перемычки на естественных грунтах составляет 4,00 м; ширина гребня – 23,50 м; длина по гребню – 236,30 м; заложение верхнего откоса – 1:1,5 (усредненное, с учетом устройства берм 1:2); заложение низового откоса – 1:2.

Разрез по временной грунтовой перемычке представлен на рисунке 2. Перемычка является сооружением II класса.

**Материалы и методы исследований.** При проведении расчетов характеристики материалов грунтов принимались в соответствии

с результатами геотехнических исследований. Геологическое строение и геометрические параметры сечения и его конструктивных элементов принимались по комплексу проектных чертежей. Расчет выполнялся в программном комплексе PLAXIS [1-4].

Расчет устойчивости выполнен на основании СП 39.13330.2012 [5]. Также учтены требования к расчетным моделям Федерального закона о безопасности зданий и сооружений № 384-ФЗ [6].

*Методика моделирования системы «Сооружение-ограждающий грунтовый массив».* Расчеты проводились методом конечных элементов с использованием программного комплекса «PLAXIS» на основе методики численного моделирования, разработанной специально для анализа деформаций и устойчивости геотехнических сооружений и успешно применяемой для расчетного обоснования отечественных и зарубежных гидроузлов, в рамках пакета геотехнических программ для конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния системы «Сооружение-основание».

Для аппроксимации выбранной расчетной области были построены конечно-элементные модели на основе неструктурированных сеток из 6 узловых элементов, которыми моделировались грунтовые слои и массивы.

В расчетах использовались уравнения упругопластической среды, соответствующие нормативному описанию грунта: упругие деформации связаны с напряжением, обобщенным законом Гука, а в предельном состоянии принимается пластическое течение без объемных пластических деформаций и без упрочнения. Критерием состояния предельного равновесия является условие текучести Кулона-Мора [7, 8].

В основании конструкции моделировались особенности инженерно-геологического строения грунтового массива. Основание моделировалось послойно с учетом геологического состава, принятого для расчетной области.

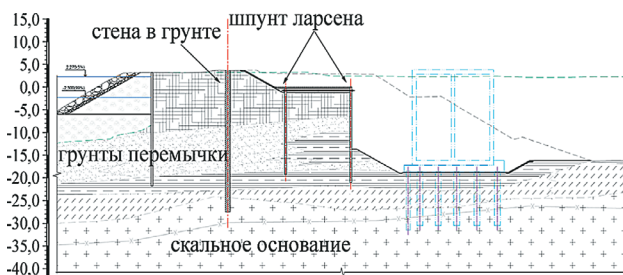


Рис. 2. Разрез по грунтовой перемычке сухого дока

Fig. 2. Section along the cofferdam of the dry dock

В качестве граничных условий были приняты жесткие вертикальные связи по нижней грани области и горизонтальные связи по боковым границам грунтовых элементов конечно-элементной области.

На рисунке 3 представлена конечно-элементная модель в расчетном сечении грунтовой перемычки. Размерность КЭ модели сечения составляет: 4619 узлов; 2168 элементов.

В конечно-элементной модели реализованы: условия контактного взаимодействия сред; нелинейные и пластичные свойства материалов; геометрическая нелинейность в виде поэтапности возведения и последовательности приложения нагрузок.

В расчете рассмотрено основное сочетание нагрузок как наиболее неблагоприятное с точки зрения устойчивости и напряженного состояния.

*Методика моделирования трубошпунтовых стенок и анкерных тяг.* Трубошпунтовые стенки моделировались с помощью элементов типа «Плита» – линейные 3- или 5-узловые элементы [9].

Анкерные тяги моделировались с помощью стержневых элементов «Межузловой анкер» типа «Пружинные элементы». Тип и характеристика элемента: 2-узловой пружинный невесомый элемент, работающий на осевое сжатие (стойка) или осевое растяжение (анкерная тяга); определяемые в узле перемещения  $U$ ,  $V$ ; возможное задание предварительного напряжения. Расчетные характеристики элемента:  $E_A$  (кН) – продольная жесткость;  $L_s$  (м) – шаг расстановки;  $F_{max, tens}$  (кН) – максимальное растягивающее усилие;  $F_{max, comp}$  (кН) – максимальное сжимающее усилие [10].

Нормативные и расчетные показатели физико-механических свойств грунтов и показатели физических свойств грунтов принимались по обобщенным данным инженерно-геологических изысканий.

**Результаты и их обсуждение.** Основные этапы, связанные с перепрофилированием

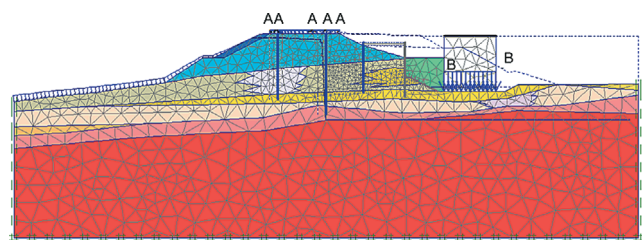


Рис. 3. Конечно-элементная модель для расчетного сечения

Fig. 3. Finite element model for the calculated section

перемычки для сечения, представлены следующими позициями:

- Этап 1. Начальный этап (естественная поверхность земли).
- Этап 2. Возведение перемычки и стены в грунте.
- Этап 3. Забивка шпунтовых свай и установка анкерных тяг.
- Этап 4. Разработка грунта за шпунтовой стенкой до отм. –17,20 м.
- Этап 5. Разработка грунта за шпунтовой стенкой до отм. –18,80 м.
- Этап 6. Возведение батопорта.
- Этап 7. Засыпка пазухи между шпунтом и батопортом до отм. –6,00 м.
- Этап 8. Удаление анкерных тяг между шпунтами.
- Этап 9. Удаление шпунта Ларсена.

Для проверки общей устойчивости грунтовой перемычки, а также несущей способности анкерных тяг, ограждающей стенки котлована под фундамент батопорта сухого дока в сечении выполнены расчеты основного сочетания нагрузок и получены результаты на следующих этапах перепрофилирования контура перемычки: этап возведения конструкций батопорта (этап 6); этап удаления анкерных тяг между шпунтовыми ограждениями (этап 8); этап удаления шпунта Ларсена (этап 9).

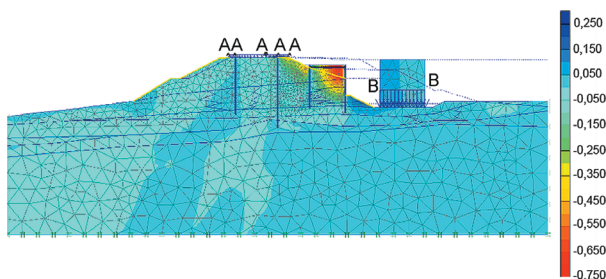


Рис. 4. Вертикальные перемещения (м) на этапе 6 возведения батопорта  
 Fig. 4. Vertical displacements (m) at stage 6 of the buttress erection

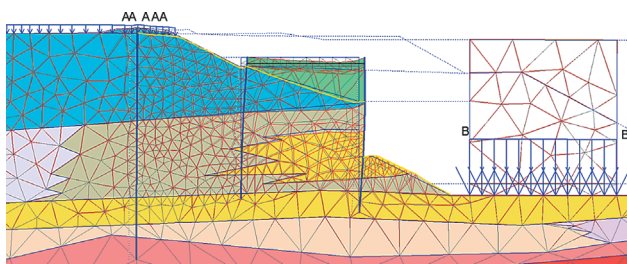


Рис. 5. Деформированное состояние конструкций шпунтового ограждения на этапе 6  
 Fig. 5. Deformed state of the sheet piling structures at stage 6

На этапе 6 возведения батопорта можно проследить существенное влияние строительных работ на борта котлована от разгрузки с последующим возведением батопорта.

На рисунке 4 представлены вертикальные перемещения, мм, на этапах 5 и 6. Как следует из рисунка А, вертикальные перемещения профиля перемычки составили 5,0 мм, перемещения от веса конструкций батопорта – 45,10 мм.

На рисунке 5 представлено деформированное состояние шпунтовых ограждений на этапе 6. Как следует из рисунка, конструкции ограждений, анкерные тяги и грунтовая призма перемычки активно взаимодействуют. При этом наиболее нагруженным шпунтовым ограждением является ограждение со стороны котлована батопорта. На рисунке 6 представлены эпюры осевых усилий, полученные в ограждении со стороны котлована батопорта. Усилия растяжения в анкерных тягах составляют 52,8 кН.

Анализ устойчивости шпунтового ограждения, как элемента системы из грунтовой перемычки анкерных тяг и ограждений, показывает, что система является устойчивой на этапе возведения батопорта – этап 6 (рис. 7). Коэффициент устойчивости составляет 1,262. Следует отметить необходимость крепления откосов во избежание снижения устойчивости ниже нормативных значений.

Расчет параметров фильтрационного потока. В результате расчета фильтрационного потока получены напоры в основании и сооружении,

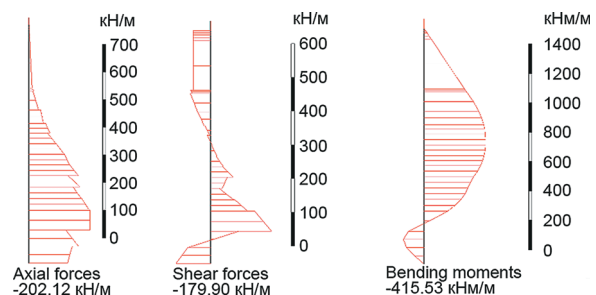


Рис. 6. Эпюры осевых усилий, поперечных усилий, изгибающих моментов шпунтового ограждения со стороны котлована батопорта на этапе 6

Fig. 6. Diagrams of axial forces, transverse forces, bending moments of the sheet piling on the side of the floating bulkhead excavation at stage 6

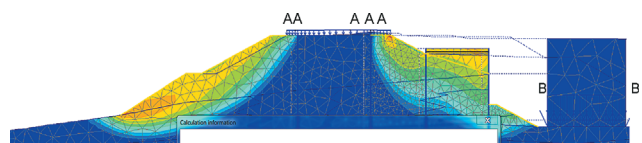


Рис. 7. Результаты расчета устойчивости на этапе 6  
 Fig. 7. Stability calculation results at stage 6

положение кривой депрессии, расход. На рисунке 8 представлено распределение порового давления фильтрационного потока.

Градиенты напора и расходы фильтрационного потока внутри расчетной области сведены в таблицу.

Фильтрационная прочность основания оценивалась путем сравнения расчетных градиентов напора с их критическими значениями согласно выражению

$$\gamma_{lc} F_0 \leq \frac{\gamma_c R_0}{\gamma_n},$$

где  $F_0 = I_{est,m}$  – осредненный градиент напора вдоль основания грунтового сооружения перемычки:

$$F_0 = I_{est,m} = \frac{22.06}{82} = 0.26.$$

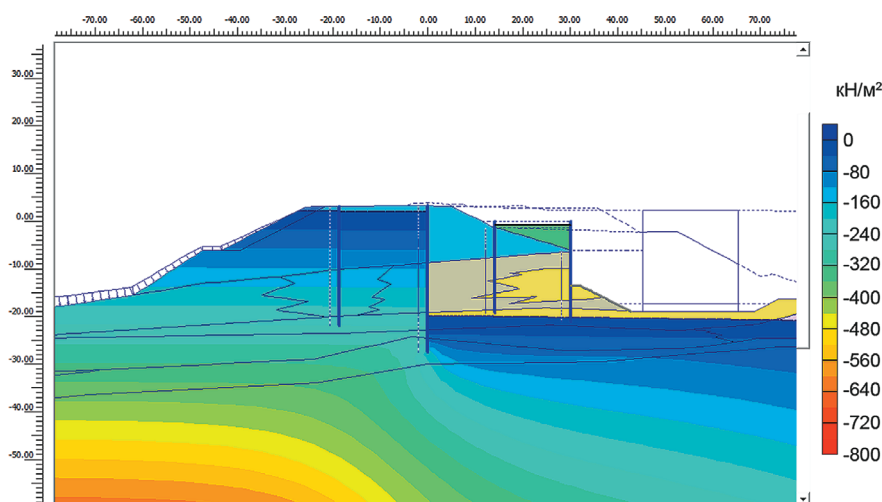


Рис. 8. Поровое давление на этапе 6, кПа

Fig. 8. Pore pressure at stage 6, kPa

**Таблица. Расходы и градиенты напора фильтрационного потока внутри расчетной области основания для сечения**

**Table. Flow rates and pressure gradients of the filtration flow inside the design area of the cross-section base**

Конструктивный элемент <i>Structural element</i>	Расположение элемента <i>Location of the element</i>	Полный фильтрационный расход, м³/сут. м <i>Full filtration flow rate, m³ / day. m</i>	Уровень воды в гипотетической скважине, м <i>Water level in a hypothetical well, m</i>
Шпунтовая стенка в сечении 3 <i>Sheet pile wall in cross-section</i>	Тело перемычки отм. -1,2...-18,6 м <i>Body of the cofferdam Level-1.2...-18.6 m</i>	0,215	-20,95
	Основание перемычки отм. -18,6...-29,7 м <i>Base of the cofferdam Level. -18.6...-29.7m</i>	0,987	

За значение  $R_0$  принимается критический градиент напора  $I_{cr,m}$  согласно п. 5.31 СП 23.13330.2018. Для супесей  $I_{cr,m} = 0.6$ .

$\gamma_n$  – коэффициент надежности по ответственности сооружения, принимаемый равным 1,20 для сооружений II класса;

$\gamma_{lc}$  – коэффициент сочетания нагрузок, принимаемый равным 1,00 при основном сочетании нагрузок;

$\gamma_c$  – коэффициент условий работы, учитывающий тип сооружения, принимаемый равным 1,00:

$$1,0 \times 0,26 \leq \frac{\gamma_{lc} \times R_0}{\gamma_c} = \frac{1.00 \times 0,60}{1,20}.$$

$0,26 \leq 0,49$ , фильтрационная прочность основания обеспечивается.

*Перемещения на этапе 6 в условиях неустановившегося режима фильтрации.* При расчетах НДС для сечения на этапе 6 были получены наибольшие горизонтальные смещения грунтового массива перемычки, а также значения усилий в расчетных сечениях, эпюры которых представлены на рисунке 9.

На этапе 8, при удалении анкерных тяг между шпунтами и при засыпке пазухи между шпунтом и батопортом до отм. -6,00 м, система шпунтовых ограждений разгружается, так как стенка со стороны котлована передает часть изгибающих усилий на засыпку пазухи.

Анализ устойчивости шпунтового ограждения, как системы из грунтовой перемычки анкерных тяг и ограждений, показывает, что система является устойчивой на этапе 8. Устойчивость повышается за счет отсыпки пазухи между шпунтом и батопортом до отм. - 6,00 м. Коэффициент устойчивости составляет более 1,253. Соответственно все конструкции в системе находятся в устойчивом состоянии, их перемещения невелики, а несущая способность обеспечена.

При удалении шпунта Ларсена (этап 9) несущая способность

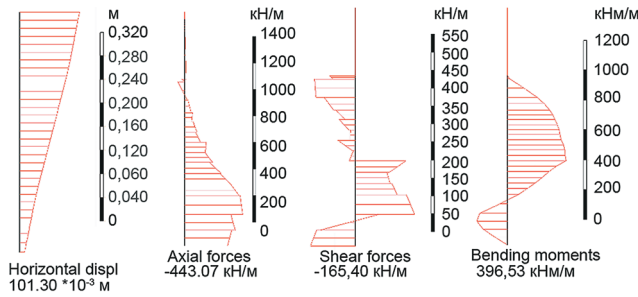


Рис. 9. Эпюры смещений, осевых и поперечных усилий, изгибающих моментов шпунтового ограждения со стороны котлована батопорта на этапе 8

Fig. 9. Axial forces, shear forces, bending moments of the sheet piling on the side of the water-trap excavation at stage 8

в ограждении со стороны перемычки существенно не изменяется, так как стенка уже не связана тягами, в том числе отсутствует какое-либо влияние на общую устойчивость перемычки. Таким образом, засыпка пазухи (этап 7) является необходимой, чтобы можно было безопасно удалить шпунт Ларсена.

Наиболее ответственными этапами относительно максимальных усилий и перемещений, на которые следует обязательно обратить внимание с точки зрения общей устойчивости системы и несущей способности шпунтовых ограждений, являются этапы разгрузки котлована и возведения конструкций батопорта (этапы 5, 6).

Расчет прочности шпунта для сечения:

Профиль шпунтовой сваи PU32+1:  
 $W = 3340 \text{ см}^3$  (на 1 пог. м).

Сталь S355J2 EN10025-2:  $R_{yn} = 355 \text{ МПа}$ .  
 $\gamma_c = 0.9$ ;  $\gamma_m = 1.05$ ;  $\gamma_n = 1.20$ ;  $\gamma_s = 1.30$ ;  
 $R_y = 0.9 \cdot 355 / 1.05 \cdot 1.20 \cdot 1.30 = 195 \text{ МПа}$ .

$\sigma = M/W = 0.4155 / 0.00334 = 124 \text{ МПа} < R_y = 195 \text{ МПа}$ .

Таким образом, сечение отвечает требованиям прочности по СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81».

Расчет прочности анкерной тяги для сечения:

Анкерная тяга с проушиной Ø56/64 × 6 × В/250 RH:  $A = 24.6 \text{ см}^2$ ,  $L = 2400 \text{ мм}$ .

Сталь S355J2 EN10025-2:  $R_{yn} = 355 \text{ МПа}$ .  
 $\gamma_c = 0.9$ ;  $\gamma_m = 1.05$ ;  $\gamma_n = 1.20$ ;  $\gamma_s = 1.30$ ;  
 $R_y = 0.9 \cdot 355 / 1.05 \cdot 1.20 \cdot 1.30 = 195 \text{ МПа}$ .

$\sigma = N \cdot L / A = 0.0528 \cdot 2.4 / 0.00246 = 51.5 \text{ МПа} < R_y = 195 \text{ МПа}$ .

Таким образом, сечение отвечает требованиям прочности по СП 16.13330.2017.

Расчет устойчивости шпунта для сечения:

Анализ устойчивости шпунта для сечения показывает, что система является устойчивой

при выполнении переуплотнения перемычки сухого дока.

Критерием обеспечения устойчивости (несущей способности) системы «Сооружение-основание» по СП 287.1325800.2016 является выполнение условия:

$$\frac{R}{F} > \frac{\gamma_{lc} \times \gamma_n}{\gamma_c} = \frac{1.00 \times 1,20}{1,00} = 1,20.$$

Коэффициент устойчивости составляет  $1,252 > 1,20$  для этапа 6;  $1,253 > 1,20$  – для этапа 8. Соответственно все конструкции в системе находятся в устойчивом состоянии, их перемещения невелики, а несущая способность обеспечена.

### Выводы

1. Выполнены расчеты устойчивости грунтовой перемычки уточненного профиля с учетом шпунтовой стенки; напряженно-деформированного состояния шпунтовой ограждающей стенки котлована фундамента батопорта; устойчивости шпунтового ограждения котлована фундамента батопорта (с уточнением его глубины, размеров и размещения анкерных тяг) без установки грунтовых анкеров. Коэффициент запаса устойчивости для расчетного этапа 6 составил  $1,252$ , для расчетного этапа 8 –  $1,253$ . Полученные коэффициенты устойчивости больше нормативного  $1,20$ .

2. Конструкция шпунтовой ограждающей стенки удовлетворяет требованиям прочности по СП 16.13330.2017. Анализ устойчивости шпунтовой ограждающей стенки показывает, что система является устойчивой при выполнении переуплотнения перемычки сухого дока по СП 287.1325800.2016.

3. В результате расчетов установлено, что устойчивость грунтовой перемычки повышается за счет отсыпки пазухи между шпунтом и батопортом до отм.  $-6,00 \text{ м}$ . Коэффициент устойчивости больше нормативного. Соответственно все конструкции грунтовой перемычки находятся в устойчивом состоянии, их перемещения невелики, а несущая способность обеспечена.

4. В результате расчетов установлено, что при удалении шпунта Ларсена несущая способность в ограждении со стороны перемычки существенно не изменяется, так как стенка уже не связана тягами, в том числе отсутствует какое-либо влияние на общую устойчивость перемычки. Таким образом, засыпка пазухи является необходимым этапом, чтобы можно было безопасно удалить шпунт Ларсена.

5. В результате расчетов установлено, что наиболее ответственными этапами относительно

максимальных усилий и перемещений, на которые следует обратить внимание с точки зрения общей устойчивости системы и несущей способности

#### Список использованных источников

1. Alkhafaji, Hazim & Imani, Meysam & Fahimifar, Ahmad. Determining the Stress-Settlement Distribution of a Gravity Dam Foundation Considering Different Water Levels Using Finite Element Method. 2021. DOI: 10.1007/978-981-15-9399-4-19.
2. Bayat, Mandana & Eslamian, Saeid & Shams, Reza & Hajiannia, Alborz. The 3D analysis and estimation of transient seepage in earth dams through PLAXIS3D software: neural network: Case study: Kord-Oliya Dam, Isfahan province. Iran: Environmental Earth Sciences, 2019. 78. 10.1007/s12665-019-8405-y.
3. Das, Rajeev & Soulaïmani, Azzeddine. Global sensitivity analysis in the design of rockfill dams. 2019. 10.1201/9780429319778-82.
4. Firoozi, Ali & Taha, Mohd & Naveen, Dr. BP & Firoozi, Ali Asghar. A Case Study: Design and Construction of Pile and Numerical Simulation by Plaxis // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 2014. № 8. Pp. 30-33.
5. СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная СНиП 2.06.05-84. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095521>.
6. О безопасности гидротехнических сооружений: Федеральный закон № 117-ФЗ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/9046062>.
7. Baotang Shen, Jingyu Shi, Nick Barton, An approximate nonlinear modified Mohr-Coulomb shear strength criterion with critical state for intact rocks // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2018. Vol. 10. Iss. 4. Pp. 645-652.
8. Hassani, Rahim & Basirat, Rouhollah & Mahmoodian, Navid. Classical Method and Numerical Modeling for Designing of Sheet Pile Wall (Case Study: Tuti-Bahri Bridge, Sudan). 2016. 10.13140/RG.2.2.10294.91208.
9. Elbakhery, Aml & El Sawwaf, Mostafa & Nazir, Ashraf & Azzam, Waseim. BEHAVIOUR OF LATERALLY ANCHORED RETAINING SYSTEM IN LOOSE SAND SOIL // Journal of Engineering Research. 2021. 10.21608/erjeng.2021.78977.1016.
10. Yajneswaran, & Ranjan, H.S. & Rao, Subba. Analysis of the Effect of Anchor Rod on the Behavior of Diaphragm Wall Using Plaxis 3d // Aquatic Procedia. 2015. № 4. Pp. 240-247. 10.1016/j.aqpro.2015.02.033.
11. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456069588>.
12. СП 287.1325800.2016. Сооружения морские причальные. Правила проектирования и строительства. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456069590>.

#### Критерии авторства

Рубин О.Д. – общее руководство работой;  
 Антонов А.С. – общее руководство работой;  
 Баклыков И.В. выполнил практические и теоретические исследования, на основании которых провел обобщение результатов;  
 Юрченко А.Н. выполнил практические исследования.  
 Рубин О.Д., Антонов А.С., Баклыков И.В., Юрченко А.Н. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

**Статья поступила в редакцию 11.01.2023**

**Одобрена после рецензирования 13.02.2023**

**Принята к публикации 28.03.2023**

шпунтовых ограждений, являются этапы разгрузки котлована и возведения конструкций ба-топорта.

#### References

1. Alkhafaji, Hazim & Imani, Meysam & Fahimifar, Ahmad. (2021). Determining the Stress-Settlement Distribution of a Gravity Dam Foundation Considering Different Water Levels Using Finite Element Method. DOI: 10.1007/978-981-15-9399-4\_19
2. Bayat, Mandana & Eslamian, Saeid & Shams, Reza & Hajiannia, Alborz. (2019). The 3D analysis and estimation of transient seepage in earth dams through PLAXIS3D software: neural network: Case study: Kord-Oliya Dam, Isfahan province, Iran. Environmental Earth Sciences. 78. 10.1007/s12665-019-8405-y.
3. Das, Rajeev & Soulaïmani, Azzeddine. (2019). Global sensitivity analysis in the design of rockfill dams. 10.1201/9780429319778-82.
4. Firoozi, Ali & Taha, Mohd & Naveen, Dr. BP & Firoozi, Ali Asghar. (2014). A Case Study: Design and Construction of Pile and Numerical Simulation by Plaxis. Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 8. 30-33.
5. SP 39.13330.2012 – Dams made of ground materials. Actualization of SNiP 2.06.05-84 <https://docs.cntd.ru/document/1200095521>
6. Federal law 117-FZ About safety of hydraulic structures <https://docs.cntd.ru/document/9046062>
7. Baotang Shen, Jingyu Shi, Nick Barton, An approximate nonlinear modified Mohr-Coulomb shear strength criterion with critical state for intact rocks, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 10, Issue 4, 2018, Pages 645-652, ISSN1674-7755, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.04.002>.
8. Hassani, Rahim & Basirat, Rouhollah & Mahmoodian, Navid. (2016). Classical Method and Numerical Modeling for Designing of Sheet Pile Wall (Case Study: Tuti-Bahri Bridge, Sudan). 10.13140/RG.2.2.10294.91208.
9. Elbakhery, Aml & El Sawwaf, Mostafa & Nazir, Ashraf & Azzam, Waseim. (2021). BEHAVIOUR OF LATERALLY ANCHORED RETAINING SYSTEM IN LOOSE SAND SOIL. Journal of Engineering Research. 10.21608/erjeng.2021.78977.1016.
10. Yajneswaran, & Ranjan, H.S. & Rao, Subba. (2015). Analysis of the Effect of Anchor Rod on the Behavior of Diaphragm Wall Using Plaxis 3d. Aquatic Procedia. 4. 240-247. 10.1016/j.aqpro.2015.02.033.
11. SP 16.13330.2017 – Steel structures. Actualized version of SNiP II-23-81 <https://docs.cntd.ru/document/456069588>
12. SP 287.1325800.2016 Offshore berthing facilities. Rule soles of designing and building <https://docs.cntd.ru/document/456069590>

#### Criteria of authorship:

Rubin O.D. – general management of the work;  
 Antonov A.S. – general management of the work;  
 Baklykov I.V. performed practical and theoretical studies, on the basis of which he summarized the results  
 Yurchenko A.N. performed practical research.  
 Rubin O.D., Antonov A.S., Baklykov I.V., Yurchenko A.N. have the copyright for the article and are responsible for the plagiarism.

**The article was submitted to the editorial board 11.01.2023**

**Approved after peer review 13.02.2023**

**Accepted for publication 28.03.2023**