

Исследование устойчивости ячеистых конструкций из плоского металлического шпунта

Егор Максимович Терихов, Александр Сергеевич Аншаков

Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В мировой практике ячеистые конструкции применяются в качестве как временных, так и постоянных сооружений. Они изготавливаются из взаимосвязанных шпунтовых свай, образующих смежные ячейки, и обычно заполняются грунтом обратной засыпки. При использовании ячеистых конструкций в качестве перемычки массивные ячейки позволяют проводить работы насухо и при необходимости производить выемку грунта основания на небольшую глубину. Так как в шпунте ячеистых конструкций из-за их формы практически не возникает изгибающих моментов, а работают они в основном на растяжение, в них применяются плоские шпунтовые сваи.

Материалы и методы. Выполнены проверки устойчивости ячеистой конструкции в соответствии с действующими нормативными документами. Для анализа и сравнения методик расчета устойчивости выбрано несколько диаметров и несколько глубин погружения шпунта. Помимо устойчивости для всех расчетных сечений определен коэффициент запаса по прочности замков. Полученные аналитическими методами результаты сравнивались с результатами, полученными в расчетном комплексе Midas FEA NX в двухмерной и трехмерной постановке.

Результаты. Получены графики зависимости коэффициентов устойчивости от заглубления и диаметра ячеистой конструкции. Проведено сравнение результатов, полученных в расчетном комплексе Midas FEA NX в двухмерной и трехмерной постановке, с аналитическими методами расчетов устойчивости.

Выводы. Численное моделирование в двухмерной постановке задачи дает схожие результаты с аналитическим решением и значительно меньший запас устойчивости в сравнении с трехмерной задачей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ячеистые конструкции, расчет устойчивости, МКЭ, Midas FEA NX, статические расчеты

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Терихов Е.М., Аншаков А.С. Исследование устойчивости ячеистых конструкций из плоского металлического шпунта // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 7. С. 1138–1150. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1138-1150

Автор, ответственный за переписку: Александр Сергеевич Аншаков, anshakov.aleks.xx@yandex.ru.

Stability analysis of cellular structures made of flat metal sheet piles

Egor M. Terikhov, Aleksandr S. Anshakov

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Cellular structures are internationally used as temporary and permanent structures. They are made of interconnected sheet piles forming adjacent cells, and they are usually filled with backfilling soil. When cellular structures are used as cofferdams, massive cells (1) make the use of cement and mortar unnecessary and (2) allow for the foundation soil to be excavated to a shallow depth. Since there are practically no bending moments in sheet piles of cellular structures due to their shape and sheet piles are mainly in tension, flat sheet piles are used to make these structures.

Materials and methods. In this study, stability of a cellular structure was analyzed in compliance with effective regulatory documents. Several values of (1) the diameter of sheet piles and (2) the sheet pile driving depth were selected to study and compare methods of stability analysis. In addition to stability, the safety factor of interlocks was found for all design sections. Analytically obtained results were compared with those computed in two- and three-dimensional settings using Midas FEANX software package.

Results. Graphs were made to demonstrate the dependence between stability factors, the depth and the diameter of a cellular structure. The results computed in two- and three-dimensional settings using Midas FEA NX software package were compared with those obtained using analytical methods of stability analysis.

Conclusions. Results of numerical modeling made in the two-dimensional setting are similar to the analytical solution. They show a substantially smaller stability factor compared to the three-dimensional problem.

KEYWORDS: cellular structures, stability analysis, FEM, Midas FEA NX, static analyses

FOR CITATION: Terikhov E.M., Anshakov A.S. Stability analysis of cellular structures made of flat metal sheet piles. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(7):1138-1150. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1138-1150 (rus.).

Corresponding author: Aleksandr S. Anshakov, anshakov.aleks.xx@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Ячеистые конструкции являются самонесущими гравитационными сооружениями, не требующими дополнительной анкеровки. Они служат экономичным решением для работ при строительстве гидротехнических объектов на больших глубинах длинномерных сооружений¹. В мировой практике ячеистые конструкции применяются в качестве как временных, так и постоянных сооружений. К временным сооружениям относятся перемычки, к постоянным — причалы, пирсы, швартовые палы и волнорезы [1–11]. При использовании ячеистых конструкций в качестве перемычки массивные ячейки позволяют проводить работы насухо [12–16] и при необходимости производить выемку грунта основания на небольшую глубину [17–21]. Они изготавливаются из взаимосвязанных шпунтовых свай, образующих смежные ячейки, и обычно заполняются грунтом обратной засыпки. Формы ячеек — круглые, диафрагменные и в виде листа клевера. Чаще всего используются круглые ячейки.

Так как в шпунте ячеистых конструкций из-за их формы практически не возникает изгибающих моментов, а работают они главным образом на растяжение, в них используются плоские шпунтовые сваи.

В соответствии с нормативным документом² основные размеры цилиндрических ячеек определяются из условия их устойчивости и прочности несущих элементов при воздействии горизонтальных нагрузок и собственного веса конструкции эксплуатационных нагрузок, формирующихся на ее территории. Глубина погружения шпунта в грунт основания устанавливается расчетом устойчивости на плоский сдвиг или по круглоцилиндрической поверхности. Также расчет устойчивости можно произвести численным моделированием. В данном исследовании для численного моделирования работы конструкции используется программный комплекс (ПК) Midas FEA NX.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оценка устойчивости различных вариантов ячеистой конструкции выполнена с помощью нор-

мативных документов^{3, 4, 5}, в которых приведены ключевые положения для расчета данных сооружений. Также осуществлены проверки устойчивости на сдвиг по логарифмической спирали. Поверхности разрушения можно представить в виде дуг логарифмических спиралей, пересекающих выступы обеих стенок. При разрушении между выступами стенок ячейки образуется выпуклая поверхность обрушения. Можно предположить, что поверхность обрушения представляет собой логарифмическую спираль с соответствующим углом внутреннего трения.

Преимущество использования логарифмической спирали состоит в том, что сила, возникающая в результате трения вдоль поверхности обрушения, проходит через ее полюс, и поэтому она не добавляет никакого удерживающего момента. Чтобы проверить устойчивость, необходимо различать случаи погружения, они представлены на рис. 1.

Результаты аналитических расчетов устойчивости сопоставлялись с численным решением в ПК Midas FEA NX в двухмерной и трехмерной постановках. Эта методика общепринята и применяется при проектировании гидротехнических сооружений в России и за рубежом [22–25].

Программный комплекс Midas FEA NX, использующий метод конечных элементов, применяется для решения различных задач, связанных со взаимодействием между сооружениями и их основаниями. Midas FEA NX позволяет учитывать поэтапность возведения сооружений, моделировать различные комбинации нагрузок и воздействий, что делает его удобным инструментом для оценок напряженно-деформированного состояния проектируемых сооружений [24].

В данной работе исследуется устойчивость перемычки из плоского металлического шпунта AS 500-9,5. Одной из особенностей конструкции является строительство «с воды». Для погружения шпунта используются специальные направляющие — кондукторы, которые дают возможность получить необходимую геометрию ячейки. После погружения шпунтовой ячейки осуществляется заполнение инертным материалом, как правило щебнем или песком. На следующем этапе производят

¹ Левачев С.Н., Корчагин Е.А., Пиляев С.И., Катаржи И.Г., Шурухин Л.А. Порты и портовые сооружения : учебное издание. М. : Издательство АСВ, 2015. 536 с.

² СП 287.1325800.2016. Сооружения морские причальные. Правила проектирования и строительства.

³ СП 38.13330.2018. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов).

⁴ СП 101.13330.2012. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения.

⁵ СП 23.13330.2018. Основания гидротехнических сооружений.

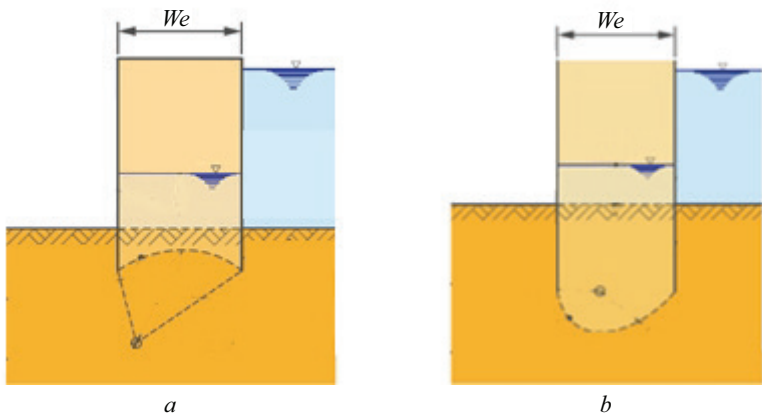


Рис. 1. Возможные формы потери устойчивости сооружения по поверхности логарифмической спирали: *a* — при частичном заглублении ячейки в грунт основания; *b* — при значительном заглублении ячейки в грунт основания

Fig. 1. Patterns of structural stability loss over the surface of a logarithmic spiral: *a* — if a cell is slightly driven in foundation soil; *b* — if a cell is deeply driven in foundation soil

выемку грунта до проектной отметки и осушение котлована [25].

Принятая к расчетам схема сооружения приведена на рис. 2.

В рамках тестовой задачи физико-механические характеристики грунтов основания и засыпки принимались одинаковыми. Принятые в расчете характеристики грунтов и конструктивных материалов приведены в табл. 1 [25].

На устойчивость ячеистой конструкции при одинаковых грунтовых условиях и нагрузках могут влиять диаметр ячеек и глубина погружения шпунта. Для анализа и сравнения методик расчета устойчивости необходимо выбрать несколько диаметров и несколько глубин погружения шпунта. Принятые к расчетам размеры сечений приведены в табл. 2.

Грунты основания и обратной засыпки в модели были выполнены из трехмерных элементов в форме

тетраэдров и гексаэдров. Плоские шпунтовые сваи задавались двумерными элементами оболочки прямоугольной формы. Для моделирования конструктивных материалов (шпунт) применялась линейно-упругая модель материала (модель Linear Elastic — LE), для которой напряжения прямо пропорциональны деформациям. Для грунтовых материалов — модель Мора – Кулона (Mohr – Coulomb — MC).

Контакты между шпунтовыми сваями и грунтом задавались с помощью элементов интерфейса для моделирования взаимодействия между поверхностями или линиями разграничения. Для задания прочностных параметров контакта использовался коэффициент понижения 0,33 от значений прочностных характеристик грунта [25]. В двухмерной постановке стенки шпунта закреплялись между собой жесткими связями из предположения их малых

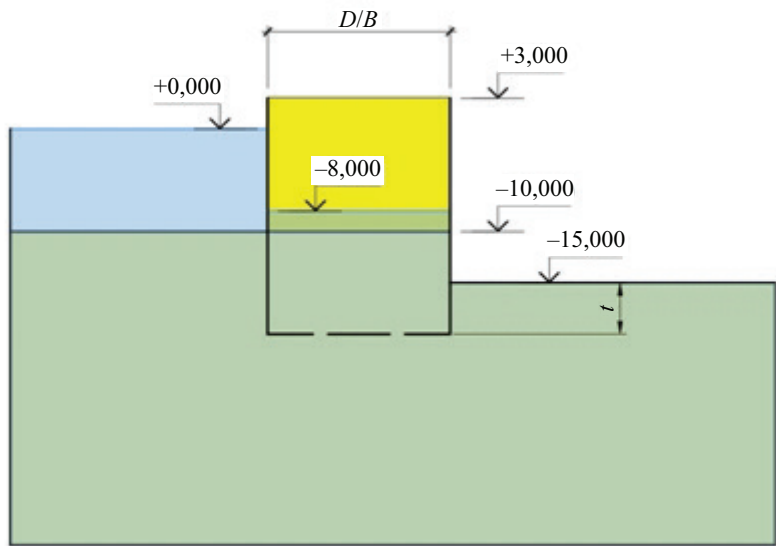


Рис. 2. Расчетная схема перемычки ячеистой конструкции

Fig. 2. Structural design of a cofferdam for a cellular structure

Табл. 1. Физико-механические характеристики материалов

Table 1. Physical and mechanical characteristics of materials

Наименование материала Material	Модель материала Material model	Модуль упругости E , МПа Modulus of elasticity E , MPa	Коэффициент Пуассона ν Poisson's ratio ν	Удельный вес сухого материала γ , кН/м ³ Unit weight of dry material γ , kN/m ³	Удельный вес в водонасыщенном состоянии γ_{sat} , кН/м ³ Unit weight (saturated) γ_{sat} , kN/m ³	Коэффициент пористости e Porosity e	Удельное сцепление c , кПа Unit adhesion c , kPa	Угол внутреннего трения φ , ° Internal friction angle φ , °
Песок Sand	Мор-Кулон Mohr-Coulomb	34	0,3	17	20	0,6	0	30
Сталь Steel	Упругий Elastic	210 000	0,3	76,5	–	–	–	–

Табл. 2. Принятые к расчетам размеры ячеистой конструкции

Table 2. Dimensions of a cellular structure used in computations

Диаметр ячейки D , м Cell diameter D , m	Эквивалентная ширина B , м Equivalent width B , m	Величина заглубления t , м Depth t , m
15,37	13,06	1,0
15,37	13,06	2,0
15,37	13,06	3,0
15,37	13,06	4,0
15,37	13,06	5,0
17,29	14,97	1,0
17,29	14,97	2,0
17,29	14,97	3,0
17,29	14,97	4,0
17,29	14,97	5,0
20,49	17,08	1,0
20,49	17,08	2,0
20,49	17,08	3,0
20,49	17,08	4,0
20,49	17,08	5,0
22,42	19,86	1,0
22,42	19,86	2,0
22,42	19,86	3,0
22,42	19,86	4,0
22,42	19,86	5,0

относительных перемещений, которыми можно пренебречь.

В качестве нагрузок в расчетной модели использовались давление воды на поверхность и нагрузка от собственного веса. В модели задавались граничные условия по перемещениям и поровому давлению. Граничные условия по перемещениям заданы одноузловыми связями на границах расчетной модели. Граничные условия порового давления задавались одноузловыми связями с указанием уровня воды в модели. В последней расчетной фазе для моделирования водопонижения на поверхности дна котлована задавалось нулевое значение порового давления [25].

Размеры расчетной области выбраны таким образом, чтобы была обеспечена необходимая точность результатов расчета. Размеры расчетной обла-

сти (140 × 102 × 40 м) должны позволить проявиться предельным состояниям, характерным как для сооружений, так и для грунтовых массивов. Общий вид конечно-элементной модели показан на рис. 3.

Учет этапности возведения сооружения в Midas FEA NX представлен на рис. 4.

Для анализа устойчивости использовался Strength reduction method (SRM), применяемый в Midas FEA NX. Метод заключается в итеративном понижении прочностных характеристик материалов в модели. Если в процессе расчета итерации система находится в равновесии, начинается следующая итерация. Коэффициент устойчивости равен понижающему коэффициенту прочностных характеристик материалов в последней сошедшей итерации решения [25].

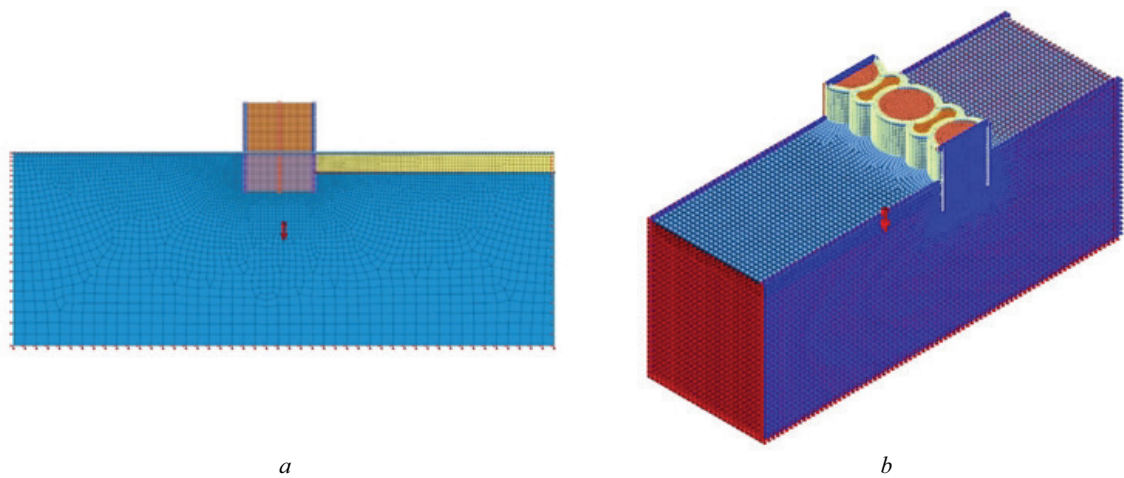


Рис. 3. Общий вид расчетной области: *a* — в двухмерной постановке; *b* — в трехмерной постановке
Fig. 3. General view of the computational domain: *a* — two-dimensional setting; *b* — three-dimensional setting

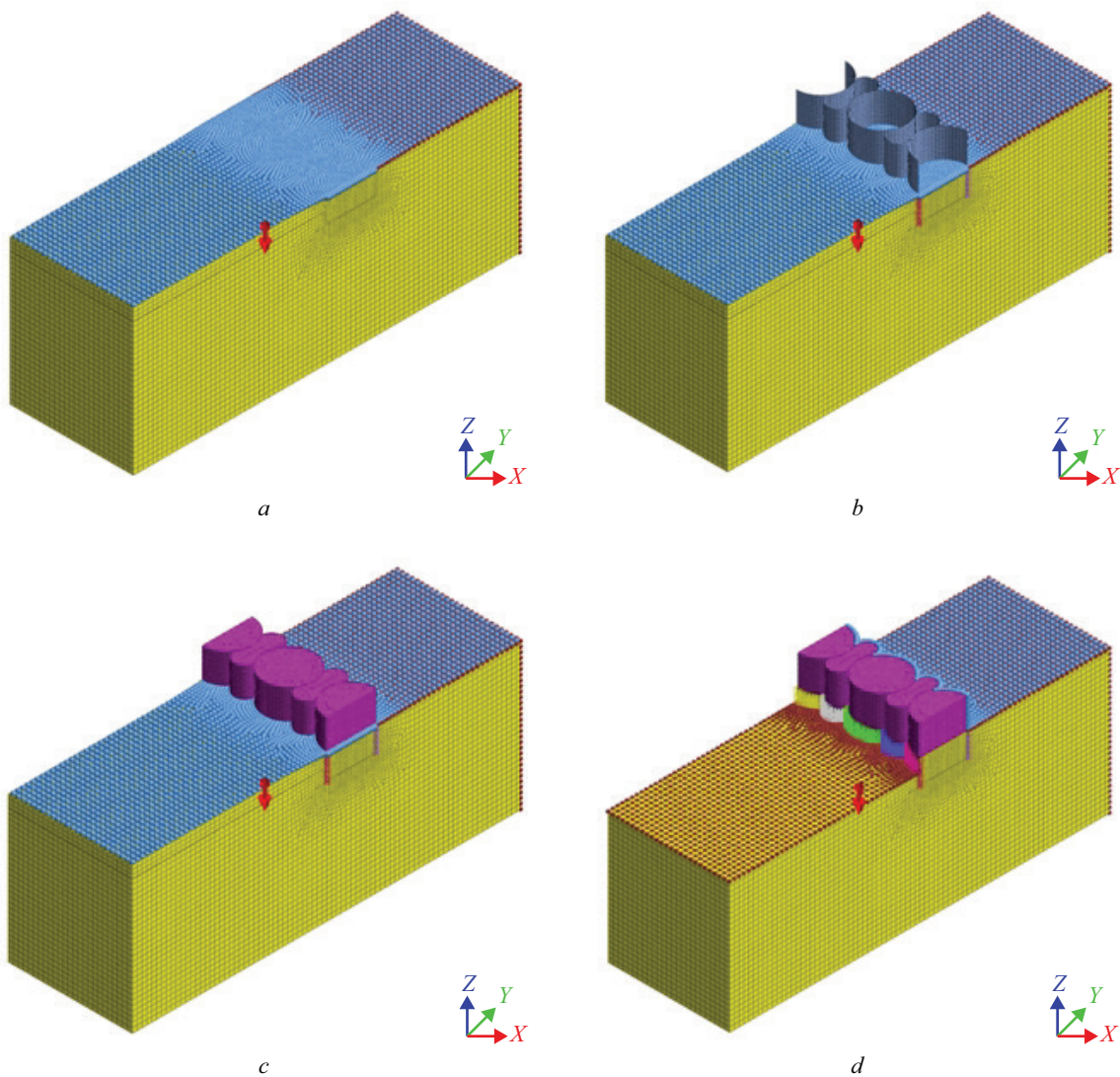


Рис. 4. Этапы расчета: *a* — исходные условия; *b* — погружение шпунта; *c* — заполнение ячеек грунтом обратной засыпки; *d* — выемка грунта и осушение котлована
Fig. 4. Computation stages: *a* — initial conditions; *b* — sheet pile driving; *c* — cell filling with backfill soil; *d* — pit excavation and dewatering

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчеты по всем нижеперечисленным аналитическим методам были проведены в Excel для всех расчетных сечений. Помимо устойчивости для всех расчетных сечений определен коэффициент запаса по прочности замков.

Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Результаты различных проверок пронумерованы в следующем порядке:

1. Проверка устойчивости на сдвиг по вертикальной плоскости.
2. Расчет прочности замковых соединений.

3. Проверка устойчивости на сдвиг по логарифмической спирали с центром спирали ниже подошвы сооружения.
4. Проверка устойчивости на сдвиг по логарифмической спирали выше подошвы сооружения.
5. Проверка устойчивости на плоский сдвиг.
6. Проверка устойчивости на глубинный сдвиг.
7. Проверка устойчивости на сдвиг по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения.
8. Результат определения коэффициента устойчивости методом SRM в двухмерной постановке.
9. Результат определения коэффициента устойчивости методом SRM в трехмерной постановке.

Табл. 3. Результаты расчета коэффициентов устойчивости сооружения и запаса прочности замков

Table 3. Computation of the stability factor for a structure and the safety factor for an interlock

Диаметр, м Diameter, m	Эквивалентная ширина, м Equivalent width, m	Заглубле- ние, м Depth, m	Коэффициенты устойчивости Safety factors								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
15,37	13,06	1	1,71	3,48	1,13	3,14	1,60	1,07	1,17	–	–
		2	1,56		1,02	2,60	1,49	1,02	1,18	–	–
		3	1,43		0,93	2,18	1,43	0,99	1,20	–	–
		4	1,32		0,85	1,86	1,39	0,99	1,22	–	–
		5	1,22		0,86	1,61	1,36	1,00	1,24	–	–
17,29	14,97	1	1,93	3,10	1,36	4,36	1,83	1,20	1,20	–	–
		2	1,75		1,22	3,59	1,70	1,14	1,21	–	–
		3	1,60		1,11	2,99	1,62	1,12	1,22	–	–
		4	1,48		1,02	2,53	1,56	1,11	1,24	–	–
		5	1,37		0,95	2,17	1,53	1,12	1,26	–	–
20,49	17,08	1	2,28	2,63	1,59	6,44	2,08	1,40	1,23	1,28	1,50
		2	2,07		1,43	5,21	1,94	1,33	1,24	1,29	–
		3	1,90		1,31	4,28	1,83	1,29	1,26	1,30	1,59
		4	1,75		1,20	3,58	1,76	1,28	1,27	1,37	–
		5	1,63		1,12	3,04	1,71	1,29	1,29	1,38	1,60
22,42	19,86	1	2,50	2,41	1,92	9,77	2,42	1,56	1,28	–	–
		2	2,27		1,74	7,74	2,24	1,48	1,29	–	–
		3	2,08		1,58	6,27	2,11	1,43	1,30	–	–
		4	1,92		1,46	5,18	2,02	1,42	1,31	–	–
		5	1,78		1,35	4,53	1,95	1,43	1,32	–	–

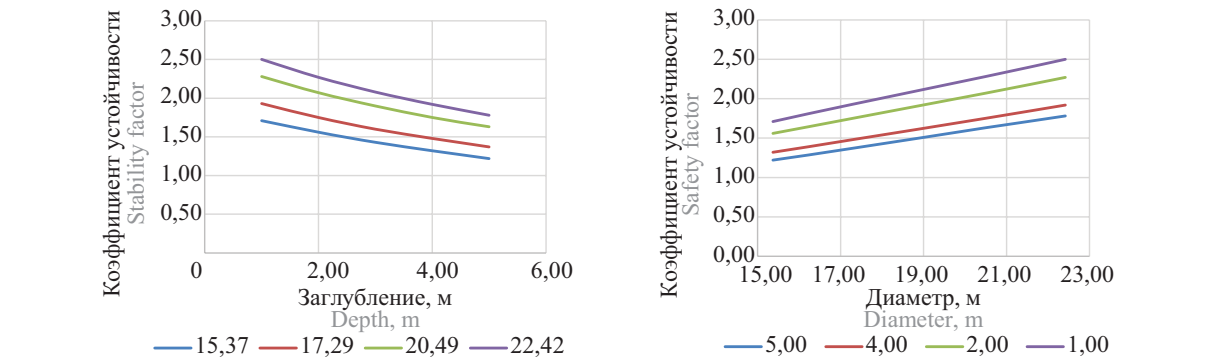


Рис. 5. График зависимости коэффициента устойчивости на сдвиг по вертикальной плоскости в зависимости от глубины погружения шпунта и диаметра ячеек

Fig. 5. Dependence between the shear stability factor in the vertical plane, sheet pile depth and the cell diameter

Графики зависимости коэффициентов устойчивости от заглубления и диаметра приведены на рис. 5–11. Результаты расчета сдвиговых деформаций, наглядно представляющих тело выпора в ходе потери устойчивости для задач в двухмерной постановке, приведены на рис. 12, для задач в трехмерной постановке — на рис. 13.

Формы потери устойчивости по логарифмическим спиралям и на плоский сдвиг в меньшей мере описывают работу сооружения, возведенного на дисперсных грунтах, не учитывая влияние ниже-лежащих грунтов. Данные формы потери устойчивости более актуальны для ячеистых сооружений, возведенных на скальных основаниях, которые

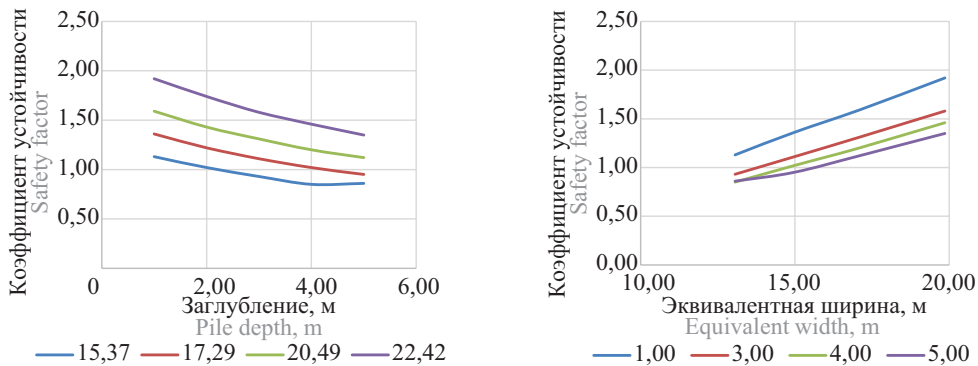


Рис. 6. График зависимости коэффициента устойчивости на сдвиг по логарифмической спирали с центром ниже подошвы сооружения в зависимости от глубины погружения шпунта и диаметра ячеек (эквивалентной ширины)
Fig. 6. Dependence between the shear stability factor for a logarithmic spiral with the center below the foundation bed, the sheet pile depth and the cell diameter (equivalent width)

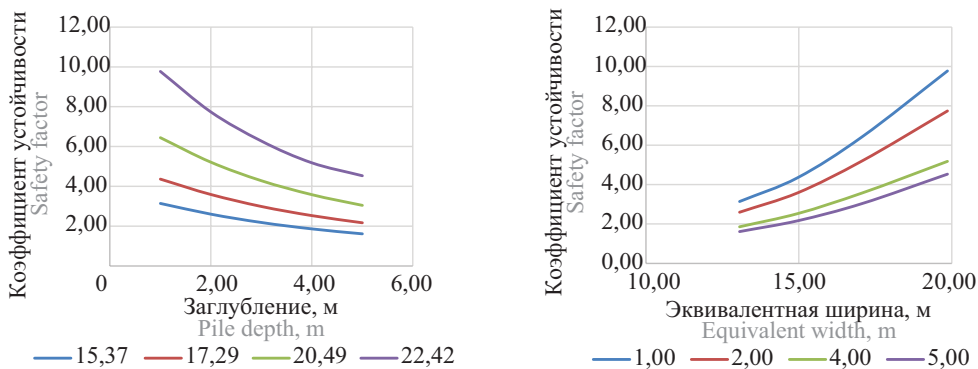


Рис. 7. График зависимости коэффициента устойчивости на сдвиг по логарифмической спирали с центром выше подошвы сооружения в зависимости от глубины погружения шпунта и диаметра ячеек
Fig. 7. Dependence between the shear stability factor for a logarithmic spiral with the center above the foundation bed, the sheet pile depth and the cell diameter

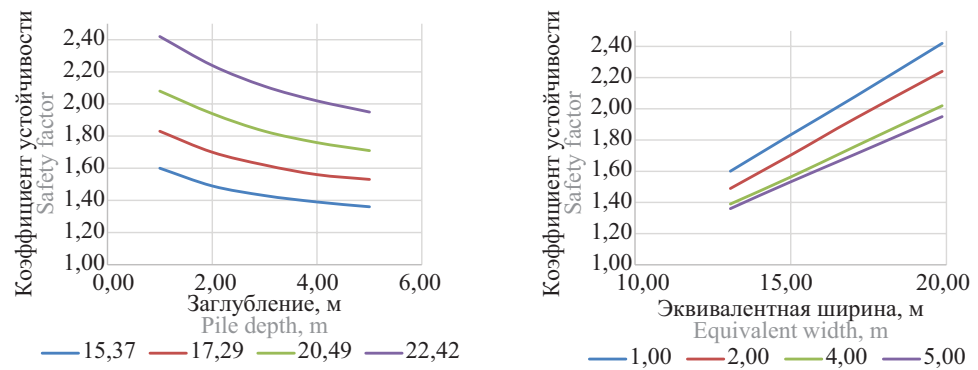


Рис. 8. График зависимости коэффициента устойчивости на плоский сдвиг в зависимости от глубины погружения шпунта и диаметра ячеек
Fig. 8. Dependence between the in-plane shear stability factor, the sheet pile depth, and the cell diameter

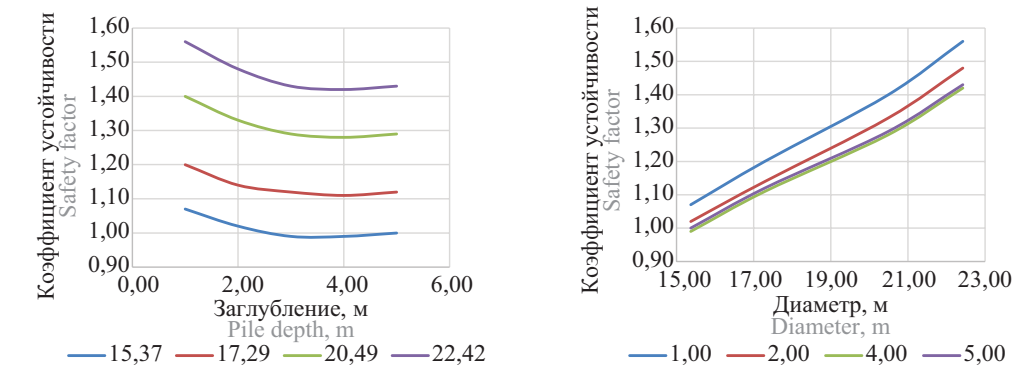


Рис. 9. График зависимости коэффициента устойчивости на глубинный сдвиг в зависимости от глубины погружения шпунта и диаметра ячеек

Fig. 9. Dependence between the deep-seated shear stability factor, the sheet pile depth, and the cell diameter

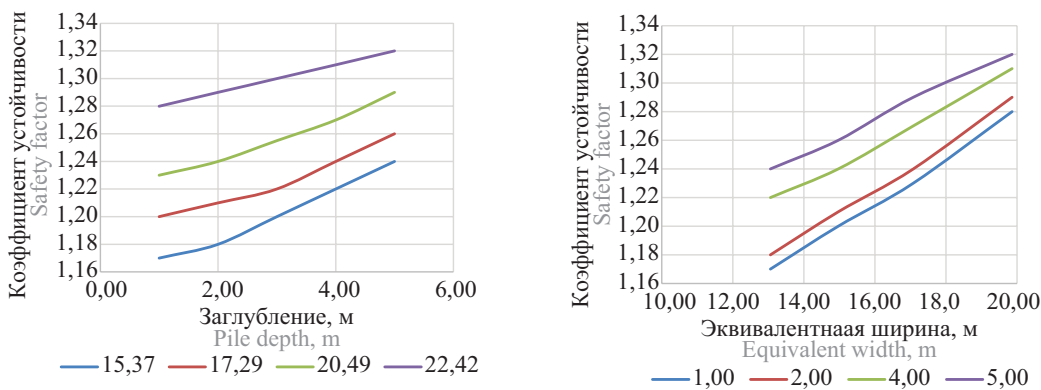


Рис. 10. График зависимости коэффициента устойчивости на сдвиг по круглоцилиндрической поверхности скольжения в зависимости от глубины погружения шпунта и диаметра ячеек

Fig. 10. Dependence between the shear stability factor for the circular cylindrical sliding surface, the sheet pile depth, and the cell diameter

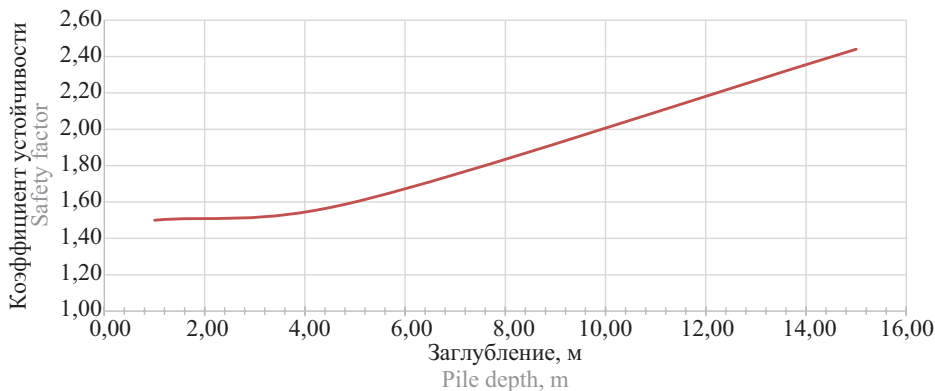


Рис. 11. График зависимости результата расчета коэффициента устойчивости в зависимости от заглубления

Fig. 11. Dependence between the resulting value of the stability factor and depth

в данном исследовании не рассматривались, но имеют место в мировой практике.

При различных размерах сооружения добиться значительных сдвиговых деформаций, представляющих собой сдвиг по вертикальной плоскости по оси сооружения, не удалось, что может быть

следствием сложности задания возможности скольжения в замковых соединениях.

При расчетах на численных моделях показано, что сооружения в виде ячеек из плоского шпунта работают как гравитационные сооружения, теряющие устойчивость преимущественно вследствие глубин-

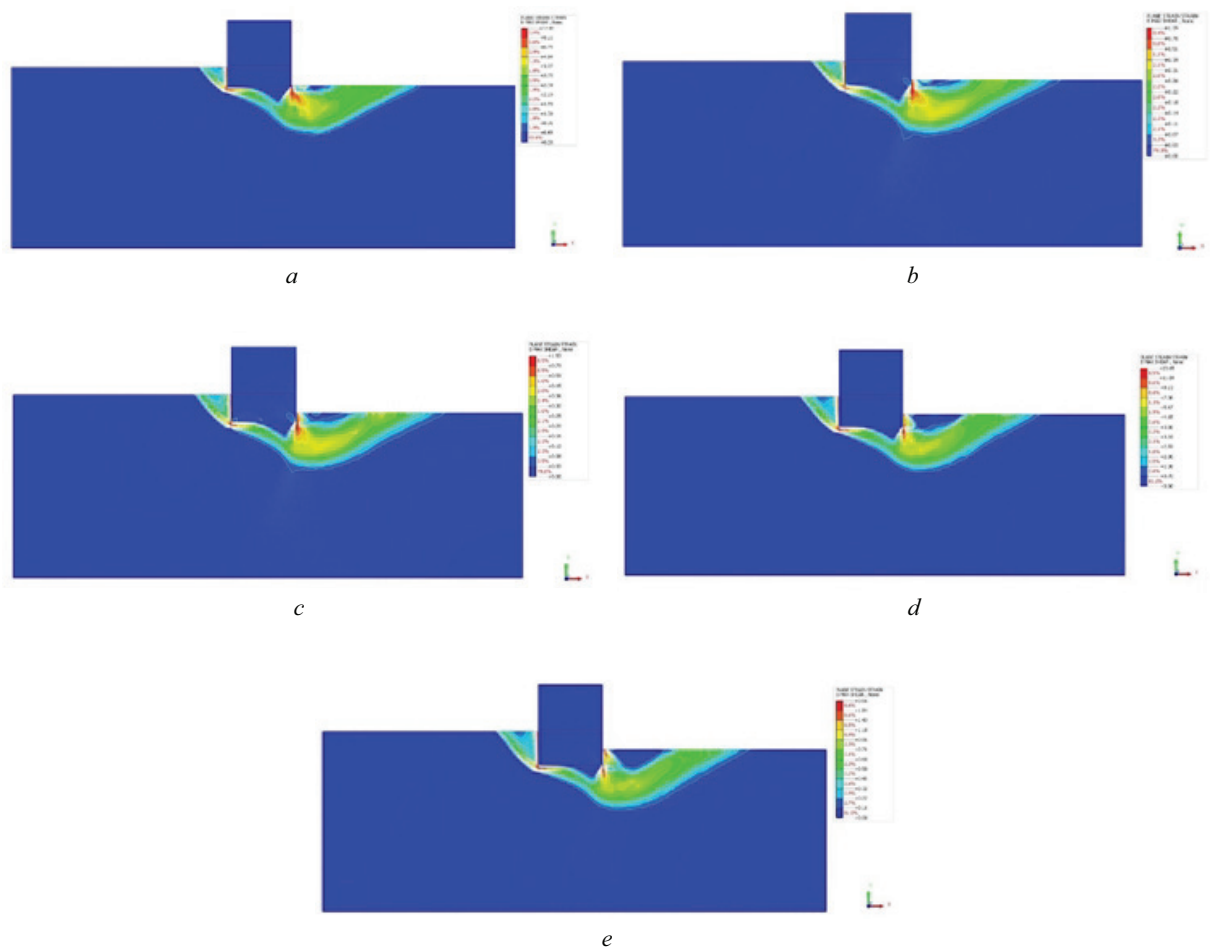


Рис. 12. Результат определения сдвиговых деформаций в двухмерной постановке с заглублением шпунта ниже отметки дна котлована при заглублении: *a* — 1 м; *b* — 2 м; *c* — 3 м; *d* — 4 м; *e* — 5 м

Fig. 12. Shear strain in the two-dimensional setting for a sheet pile driven below the excavation bottom for the following depth values: *a* — 1 m; *b* — 2 m; *c* — 3 m; *d* — 4 m; *e* — 5 m

ного сдвига. Формы поверхности обрушения в аналитических и численных расчетах довольно похожи, однако характерные размеры сдвигающегося тела и полученные коэффициенты устойчивости расходятся, что видно на рис. 14.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По графикам результатов аналитических расчетов можно сделать вывод, что наиболее влияющим на устойчивость сооружения фактором является диаметр ячеек. Однако с увеличением заглубления шпунта в основание коэффициенты по разным формам потери устойчивости, кроме расчета по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения, имеют нисходящую тенденцию.

Результаты расчета численных моделей показывают, что поверхность сдвига при потере устойчивости аналогична кривой, получаемой аналитическим методом расчета устойчивости по схеме глубинного сдвига, но расчетный коэффициент устойчивости по аналитическому методу значительно ниже.

Специфическим расчетом ячеистых конструкций из шпунта является расчет устойчивости на сдвиг по вертикальной плоскости, однако при численном моделировании не возникло предпосылок к данному сдвигу. Причиной тому может служить условность расчетной модели. Так как шпунт задается двумерными элементами в грунтовом массиве, задать возможность проскальзывания в замках проблематично, а сила трения в замках является одной из составляющих этого расчета.

Различия в результатах аналитических и численных расчетов в трехмерной постановке объясняются сложной работой сооружения. Ячеистые конструкции обеспечивают устойчивость одновременно и за счет собственного веса, как гравитационного сооружения, и за счет защемления в грунте. Но, поскольку ячейка представляет собой оболочку со свободными пятнами шпунтовых свай, в которой находится грунт, возникает сложное взаимодействие грунта снаружи и внутри ячейки, которое, если судить по полученным результатам, не описывается теорией предельного равновесия, как, например, грунтовое давление на тонкие стенки.

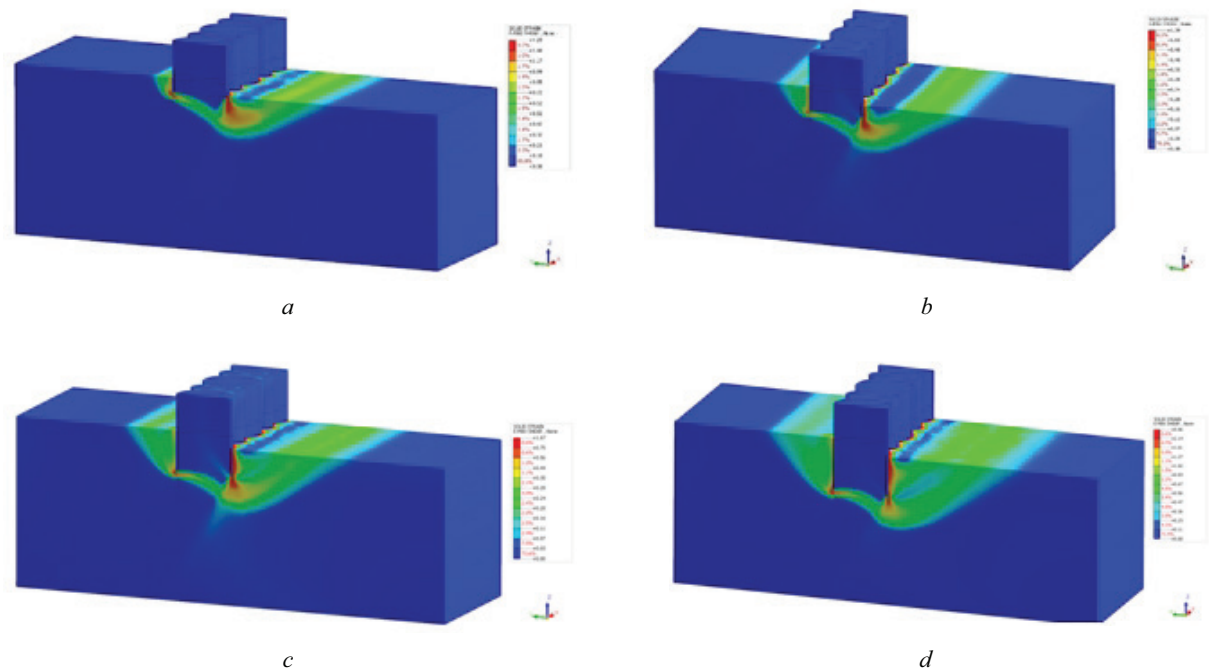


Рис. 13. Результат определения сдвиговых деформаций в трехмерной постановке с заглублением шпунта ниже отметки дна котлована: *a* — 1 м; *b* — 5 м; *c* — 10 м; *d* — 15 м

Fig. 13. Shear strain in the three-dimensional setting for a sheet pile driven below the excavation bottom for the following depth values: *a* — 1 m; *b* — 5 m; *c* — 10 m; *d* — 15 m

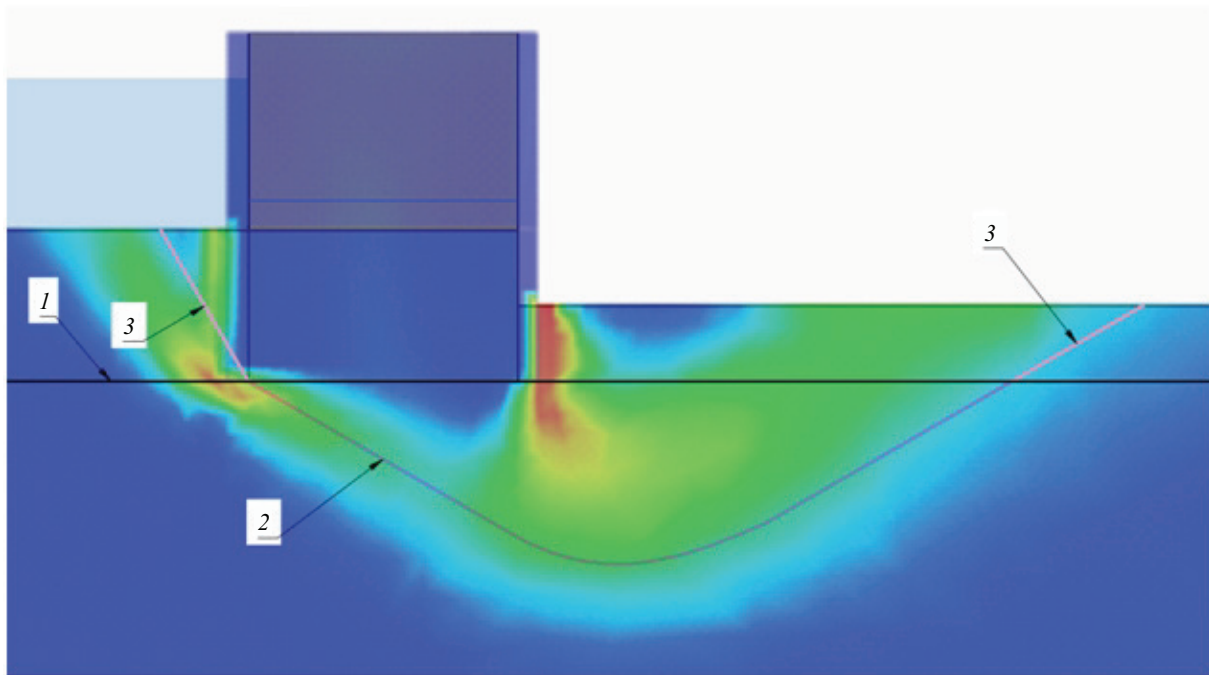


Рис. 14. Сопоставление полученных результатов расчета устойчивости по схеме глубинного сдвига: *1* — граница расчетной области при аналитическом расчете; *2* — положение поверхности сдвига, полученное аналитическим расчетом; *3* — предполагаемое продолжение поверхности сдвига

Fig. 14. Compared stability computations made using the deep-seated shear method: *1* — computational domain boundary for the analytical method; *2* — position of the shear surface determined analytically; *3* — anticipated continuation of the shear surface

Численное моделирование в двухмерной постановке задачи дает схожие результаты с аналитическим решением и значительно меньший запас устойчивости в сравнении с трехмерной задачей. Также из-за принятых допущений в виде жестких связей стенок между собой усилия в шпунте определить не представляется возможным.

Выведение более точной аналитической методики расчета ячеистых конструкций — сложная

задача, так как в работе сооружения участвует множество факторов от разных геологических условий до специфических нагрузок. При проектировании в первом приближении основные размеры сооружения допустимо принять при выполнении вышеописанных аналитических условий или численными расчетами в двухмерной постановке, после чего в дальнейшем необходимо уточнить результаты расчетами в трехмерной постановке.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Smith T.W., Page M.J., Carchedi D.R.* Cellular pier rehabilitation design // *Ports* 2022. 2022. DOI: 10.1061/9780784484395.012
2. *Zhang Y., Li S., Li H., Li K., Han M.* Installation design of a large tubular caisson in the spatially varying seabed // *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 246. P. 110626. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110626
3. *Liu R., Yuan Y., Fu D., Sun G.* Numerical investigation to the cyclic loading effect on capacities of the offshore embedded circular foundation in clay // *Applied Ocean Research*. 2022. Vol. 119. P. 103022. DOI: 10.1016/j.apor.2021.103022
4. *Wu Y., Li D., Yang Q., Zhang Y.* Resistance to skirt-tip with external bevels of suction caissons penetrating clay // *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 249. P. 110909. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110909
5. *Song L., Zhao H., Li J., Yang Q.* Failure mode and mechanism of large cylinder structures for artificial islands on soft clay // *Applied Ocean Research*. 2022. Vol. 119. P. 103032. DOI: 10.1016/j.apor.2021.103032
6. *Xiao Z., Song L., Li J.* Stability of the large cylindrical structures in Hong Kong–Zhuhai–Macao bridge: A case study // *Applied Ocean Research*. 2020. Vol. 97. P. 102092. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102092
7. *Dağlı B., Yiğit M.E., Gökkuş Ü.* Behaviour of large cylindrical offshore structures subjected to wave loads // *TEM Journal*. 2017. Vol. 6. Issue 3. Pp. 550–557. DOI: 10.18421/TEM63-16
8. *Xiao Z., Wang Y.Z., Ji C.N., Huang T.K., Shan X.* Stability analysis of large cylindrical structure for strengthening soft foundation under wave load // *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*. 2010. Vol. 31. Issue 8. Pp. 2648–2654.
9. *Kim J., Jeong Y.J., Park M.S.* Structural behaviors of cylindrical cofferdam with plane and corrugated cross section under offshore conditions // *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2017. Vol. 7. Issue 9. Pp. 334–340.
10. *Kim J., Jeong Y.-J., Park M.-S., Song S.* Structural analysis of offshore cofferdam subjected to wave load and suction pressure // *Open Journal of Civil Engineering*. 2018. Vol. 8. Issue 4. Pp. 555–569. DOI: 10.4236/ojce.2018.84040
11. *Kim J., Jeong Y.J., Park M.S., Song S.* Numerical investigation on buckling behavior of suction-installed cofferdam // *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2018. Vol. 7. Issue 11. DOI: 10.17577/IJERTV7IS110103
12. *Gahlot R., John R., Zemse R.* Cofferdams-forces analysis and design criteria // *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2014. Vol. 5. Issue 12.
13. *Ciammaichella M., Tantalla J.* Temporary cellular cofferdam design, installation and removal at Willow Island hydroelectric project // *Proceedings of HydroVision*. 2014. Pp. 2–7.
14. *Weinmann T., Nyren R., Marr W.A.* Exposure of deep foundations for the Kentucky lock addition project // *IFCEE* 2015. 2015. DOI: 10.1061/9780784479087.234
15. *Bittner R., Kirk N.* Cofferdam solution for steeply sloping rock using flat-sheet piles // *Proceedings of the 39th Annual Conference on Deep Foundations*. 2014.
16. *Geotechnical design parameters for retaining walls, sound barrier walls and non-critical slopes // Staunton Materials Section, VDOT Staunton District. Virginia Department of Transportation*. 2013.
17. *Yazdani M., Azad A., Farshi A.H., Talatahari S.* Extended “Mononobe-Okabe” method for seismic design of retaining walls // *Journal of Applied Mathematics*. 2013. Vol. 2013. Pp. 1–10. DOI: 10.1155/2013/136132
18. *Warrick J.A., Bountry J.A., East A.E., Magirl C.S., Randle T.J., Gelfenbaum G. et al.* Large-scale dam removal on the Elwha River, Washington, USA: Source-to-sink sediment budget and synthesis // *Geomorphology*. 2015. Vol. 246. Pp. 729–750. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.01.010
19. *Tockner K., Zarfl C., Alex E., Berlekamp J., Tydecks L.* Future boom in hydropower dam construction will change the global map (Slides) // *17th International River symposium: Excellence Collaboration-Integration*. 2014. Pp. 1–8.
20. *Rose A.T.* Using the 1911 Austin dam failure case history in undergraduate teaching // *7th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. 2013.
21. *Mohan R.* Review of environmental dredging in North America: current practice and lessons learned // *J. Dredging*. 2016. Vol. 15. Issue 2. P. 29.

22. Saba M.R., Abbas B., Al-Humairi B.A. Finite element model to study the deformation of circular cellular cofferdams by using ansys program // Journal of University of Babylon for Engineering Sciences. 2014. Vol. 22. Issue 1. Pp. 123–132.

23. Prassettyo S.H., Gutierrez M. Cellular cofferdams as permanent hydropower dam structures // 2018 U.S. Society on Dams Conference and Exhibition. 2018.

24. Al-Tae K.N., Al-Rammahi S.H. Stability analysis of cellular retaining structure by plaxis finite element code // The Iraqi Journal for Mechanical and Material Engineering. 2018. Special Issue (D). Pp. 599–612.

25. Терихов Е.М., Анишаков А.С. Анализ методов расчета устойчивости ячеистых конструкций // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 7. С. 1104–1113. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.1104-1113

Поступила в редакцию 1 марта 2024 г.

Принята в доработанном виде 21 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 29 марта 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Егор Максимович Терихов** — аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ResearcherID: HTQ-6323-2023; terikhovegor@mail.ru;

Александр Сергеевич Анишаков — кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 864818, Scopus: 57202806387, ResearcherID: ABA-6753-2020, ORCID: 0000-0002-0437-3109; anshakov.aleks.xx@yandex.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Smith T.W., Page M.J., Carchedi D.R. Cellular pier rehabilitation design. *Ports* 2022. 2022. DOI: 10.1061/9780784484395.012

2. Zhang Y., Li S., Li H., Li K., Han M. Installation design of a large tubular caisson in the spatially varying seabed. *Ocean Engineering*. 2022; 246:110626. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110626

3. Liu R., Yuan Y., Fu D., Sun G. Numerical investigation to the cyclic loading effect on capacities of the offshore embedded circular foundation in clay. *Applied Ocean Research*. 2022; 119:103022. DOI: 10.1016/j.apor.2021.103022

4. Wu Y., Li D., Yang Q., Zhang Y. Resistance to skirt-tip with external bevels of suction caissons penetrating clay. *Ocean Engineering*. 2022; 249:110909. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110909

5. Song L., Zhao H., Li J., Yang Q. Failure mode and mechanism of large cylinder structures for artificial islands on soft clay. *Applied Ocean Research*. 2022; 119:103032. DOI: 10.1016/j.apor.2021.103032

6. Xiao Z., Song L., Li J. Stability of the large cylindrical structures in Hong Kong–Zhuhai–Macao bridge: A case study. *Applied Ocean Research*. 2020; 97:102092. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102092

7. Dağlı B., Yiğit M.E., Gökkuş Ü. Behaviour of large cylindrical offshore structures subjected to Wave loads. *TEM Journal*. 2017; 6(3):550–557. DOI: 10.18421/TEM63-16

8. Xiao Z., Wang Y.Z., Ji C.N., Huang T.K., Shan X. Stability analysis of large cylindrical structure for strengthening soft foundation under wave load. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*. 2010; 31(8):2648–2654.

9. Kim J., Jeong Y.J., Park M.S. Structural behaviors of cylindrical cofferdam with plane and corrugated cross section under offshore conditions. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2017; 7(9):334–340.

10. Kim J., Jeong Y.-J., Park M.-S., Song S. Structural analysis of offshore cofferdam subjected to wave load and suction pressure. *Open Journal of Civil Engineering*. 2018; 8(4):555–569. DOI: 10.4236/ojce.2018.84040

11. Kim J., Jeong Y.J., Park M.S., Song S. Numerical investigation on buckling behavior of suction-installed cofferdam. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2018; 7(11). DOI: 10.17577/IJERTV7IS110103

12. Gahlot R., John R., Zemse R. Cofferdams-forces analysis and design criteria. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2014; 5(12).

13. Ciammaichella M., Tantalla J. Temporary cellular cofferdam design, installation and removal at Willow Island hydroelectric project. *Proceedings of HydroVision*. 2014; 2–7.

14. Weinmann T., Nyren R., Marr W.A. Exposure of Deep Foundations for the Kentucky Lock Addition Project. *IFCEE 2015*. 2015. DOI: 10.1061/97807844-79087.234

15. Bittner R., Kirk N. Cofferdam solution for steeply sloping rock using flat-sheet piles. *Proceedings of the 39th Annual Conference on Deep Foundations*. 2014.

16. Geotechnical design parameters for retaining walls, sound barrier walls and non-critical slopes. Staunton Materials Section, VDOT Staunton District. *Virginia Department of Transportation*. 2013

17. Yazdani M., Azad A., Farshi A.H., Talatahari S. Extended “Mononobe-Okabe” method for seismic design of retaining walls. *Journal of Applied Mathematics*. 2013; 2013:1-10. DOI: 10.1155/2013/136132
18. Warrick J.A., Bountry J.A., East A.E., Magirl C.S., Randle T.J., Gelfenbaum G. et al. Large-scale dam removal on the Elwha River, Washington, USA: Source-to-sink sediment budget and synthesis. *Geomorphology*. 2015; 246:729-750. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.01.010
19. Tockner K., Zarfl C., Alex E., Berlekamp J., Tydecks L. Future boom in hydropower dam construction will change the global map (Slides). *17th International River symposium: Excellence Collaboration-Integration*. 2014; 1-8.
20. Rose A.T. Using the 1911 Austin dam failure case history in undergraduate teaching. *7th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. 2013.
21. Mohan R. Review of environmental dredging in North America: current practice and lessons learned. *J. Dredging*. 2016; 15(2):29.
22. Saba M.R., Abbas B., Al-Humairi B.A. Finite element model to study the deformation of circular cellular cofferdams by using ansys program. *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*. 2014; 22(1):123-132.
23. Prasetyo S.H., Gutierrez M. Cellular cofferdams as permanent hydropower dam structures. *2018 U.S. Society on Dams Conference and Exhibition*. 2018.
24. Al-Tae K.N., Al-Rammahi S.H. Stability analysis of cellular retaining structure by PLAXIS finite element code. *The Iraqi Journal for Mechanical and Material Engineering*. 2018; Special Issue (D):599-612.
25. Terikhov E.M., Anshakov A.S. Analysis of methods for calculating the stability of cellular structures. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(7):1104-1113. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7. 1104-1113 (rus.).

Received March 1, 2024.

Adopted in revised form on March 21, 2024.

Approved for publication on March 29, 2024.

B I O N O T E S : **Egor M. Terikhov** — postgraduate student of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ResearcherID: HTQ-6323-2023; terikhovegor@mail.ru;

Aleksandr S. Anshakov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 864818, Scopus: 57202806387, ResearcherID: ABA-6753-2020, ORCID: 0000-0002-0437-3109; anshakov.aleks.xx@yandex.ru.

Contribution of the authors: all of the authors made equivalent contributions to the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.